



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Tema: Evaluación del potencial de los residuos agrícolas de maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como sustratos para el cultivo del hongo cola de pavo (*Trametes versicolor*).

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

Autor: Martha Beatriz Tenorio Quishpe

Tutor: 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, 05 de junio de 2026



Dra. Mirari Yosune Arancibia Soria

18XXXXXXX61

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Martha Beatriz Tenorio Quishpe, manifiesto que los resultados obtenidos en el Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera Biotecnóloga son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Martha Beatriz Tenorio Quishpe

05XXXXXXX73

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 mis derechos de autor.



Martha Beatriz Tenorio Quishpe

05XXXXXX73

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 Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LANDER VINICIO
PEREZ ALDAS**

Presidente del Tribunal



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**WILLIAM RICARDO
CALERO CACERES**

Dr. William Ricardo Calero Cáceres

17XXXXXX59



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LILIANA PAULINA
LALALEO CORDOVA**

Dra. Liliana Paulina Lalaleo Córdova

18XXXXXX53

Ambato, 19 de junio de 2026

DEDICATORIA

A Dios, por ser fuente de sabiduría y fortaleza a lo largo de este camino, por iluminar cada decisión y sostenerme en los momentos en que las dificultades amenazaban con interrumpir el avance.

A mis padres, Marlene Quishpe y Manuel Tenorio, pilares fundamentales de mi formación personal y profesional, quienes inculcaron en mí los valores del esfuerzo, la constancia, la responsabilidad y la vocación por aquello que se emprende con convicción. Todo cuanto he logrado es reflejo de su ejemplo y dedicación. A mi madre, en particular, le reconozco este logro como propio: su apoyo incondicional, su esfuerzo sostenido y su presencia constante hicieron posible la culminación de esta etapa.

A mis abuelos, Teodoro, Luis y Mercedes, quienes hoy descansan en paz. Su memoria permanece viva en cada paso que doy, y tengo la certeza de que desde donde se encuentran, acompañan y celebran este logro conmigo.

A Cristian, mi hermano, por su presencia constante, incluso en aquellos momentos en que no era del todo perceptible. Sus anécdotas y su particular manera de afrontar la vida me ofrecieron perspectivas valiosas, y su carácter me motivó a tomar decisiones con mayor convicción cuando así lo requería la situación. Asimismo, a Andrew, mi sobrino, cuya compañía fue un regalo cotidiano; su alegría espontánea y su inocencia me recordaron, en medio de las exigencias académicas, que la vida guarda siempre motivos para sonreír.

A mis amigos más cercanos, por su confianza genuina en mis capacidades, por el aliento brindado en los momentos más exigentes y por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que formaron parte de mi vida durante esta etapa. Su acompañamiento, sus palabras de aliento y su contribución, en distintas formas y momentos, fueron determinantes para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por brindarme la fortaleza y la guía necesarias para culminar esta etapa junto a las personas que más amo.

Agradezco a mis padres; a mi madre, Marlene Quishpe, por haberme brindado la herencia más valiosa que existe, la educación. Gracias por ser mi principal fuente de inspiración; tu constancia, esfuerzo y amor incondicional fueron el sostén que me impulsó a continuar en los momentos de mayor dificultad. Un abrazo tuyo fue siempre refugio y fortaleza; soy quien soy gracias a tu ejemplo y dedicación. A mi padre, Manuel Tenorio, gracias por tu presencia, por los conocimientos prácticos que me transmitiste y por el cuidado constante que me brindaste a lo largo de este proceso.

A Cris, Chintya y Andrew, gracias por integrarme en sus experiencias, por compartir vivencias enriquecedoras y por haberme brindado un espacio de escucha y contención cuando lo necesité; la calidez con la que me acogieron en cada momento difícil fue, sin duda, uno de los sostenes más genuinos a lo largo de este camino.

A mi tía, Lulú, por el afecto sincero que me has demostrado, por mantenerte presente a pesar de la distancia y por ofrecerme siempre un segundo hogar; gracias por compartir tu vida conmigo y por escucharme con genuino interés. A Martha, Segundo y Washington, mis tíos, quienes a su manera estuvieron al pendiente de mí; sus valores y su forma de afrontar la vida me inspiraron a cultivar una mayor fortaleza y coherencia en mis propias decisiones, su interés discreto pero sincero fue una forma de afecto que no pasó desapercibida, saber que contaba con su mirada atenta representó un apoyo silencioso pero significativo durante este proceso.

A Thalia, Erika y Mateo M., mis mejores amigos, por su lealtad y compañía a lo largo de todo este proceso. Gracias por su paciencia, por ser un espacio seguro donde encontré apoyo y comprensión, y por cada experiencia y anécdota compartida que forma ya parte de mi historia, gracias por ser mi lugar seguro.

A mi tutora, Mirari Arancibia, por depositar su confianza en mí para el desarrollo de esta investigación. Su orientación académica, paciencia, disposición permanente y retroalimentación constructiva fueron elementos fundamentales para la consecución de este trabajo.

A todos mis docentes, por haber contribuido a mi formación integral, transmitiendo no solo conocimientos disciplinares, sino también valores y herramientas para afrontar los desafíos del ejercicio profesional con ética y responsabilidad.

Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este camino. A cada amigo y compañero que compartió momentos significativos conmigo: me llevo lo mejor de cada uno, junto con el reconocimiento sincero de su valioso apoyo.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
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. Residuos lignocelulósicos	2
1.1.2.1 Definición y contexto ecuatoriano	2
1.1.2.2 Composición química	2
1.1.2.3 Importancia biotecnológica.....	3
1.1.3. Residuos de maíz y caña de azúcar	3
1.1.3.1 Características de <i>Zea mays</i>	3
1.1.3.2 Características de <i>Saccharum officinarum</i>	4
1.1.4. Sustratos para cultivo fúngico	4
1.1.4.1 Propiedades físicoquímicas y estructurantes.	4
1.1.4.2 Preparación, esterilización y tratamiento	5
1.1.4.3 Potencial del maíz y caña como sustratos	6
1.1.5. Hongos ligninolíticos y de pudrición blanca	8
1.1.6. <i>Trametes versicolor</i>	9
1.1.6.1 Características generales y taxonómicas	9
1.1.6.2 Mecanismos y enzimas de degradación	10

1.1.6.3	Aplicaciones	12
1.1.7.	Parámetros de evaluación del cultivo fúngico	13
1.1.7.1	Crecimiento micelial.....	13
1.1.7.2	Colonización.....	13
1.1.7.3	Eficiencia biológica y fructificación	14
1.2.	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivo general	14
1.1.1.	Objetivos Específicos.....	14
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.....		15
2.1.	Materiales.....	15
2.2.	Métodos	15
2.2.1	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas	15
2.2.1.1	Muestreo y caracterización fisicoquímica inicial	15
2.2.1.2	Pretratamiento del material lignocelulósico	16
2.2.1.3	Preparación del sustrato previo a la inoculación	16
2.2.2	Evaluación del crecimiento y colonización micelial de <i>Trametes versicolor</i>	17
2.2.2.1	Ensayo preliminar in vitro de crecimiento micelial.....	17
2.2.2.2	Preparación del inóculo.....	18
2.2.2.3	Inoculación del sustrato	18
2.2.2.4	Incubación y colonización	18
2.2.2.5	Fructificación.....	19
2.2.3	Análisis de la colonización fúngica.....	19
2.2.3.1	Evaluación de la producción y análisis fisicoquímicos	19
2.2.3.2	Análisis de resultados	20
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		21
3.1.	Análisis y discusión de los resultados	21
3.1.1	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas	21
3.1.1.1	Humedad, pH y descripción física	21
3.1.1.2	Composición proximal de los sustratos.....	23
3.1.1.3	Composición carbono-nitrógeno.....	25

3.1.2	Evaluación del crecimiento y colonización micelial de <i>Trametes versicolor</i>	26
3.1.3	Análisis estadístico de la colonización fúngica	37
3.1.3.1	Porcentaje de colonización en placa (día 4)	37
3.1.3.2	Tasa de crecimiento micelial diario.....	39
3.1.3.3	Porcentaje de colonización estimado en bolsa	41
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		45
4.1.	Conclusiones	45
4.2.	Recomendaciones.....	46
BIBLIOGRAFÍA		47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparación del potencial como sustratos fúngicos de maíz y caña de azúcar.</i>	7
Tabla 2. <i>Mecanismo de acción de las ligninasas</i>	10
Tabla 3. <i>Lista de reactivos y equipos utilizados</i>	15
Tabla 4. <i>Caracterización fisicoquímica y descripción estructural de los residuos agrícolas y del material estructurante</i>	21
Tabla 5. <i>Composición proximal de los materiales lignocelulósicos evaluados (base seca)</i>	23
Tabla 6. <i>Estimación de la relación carbono-nitrógeno (C/N) de los materiales lignocelulósicos evaluados</i>	25
Tabla 7. <i>Estimación del porcentaje de colonización en fundas</i>	29
Tabla 8. <i>Evaluación del micelio de <i>Trametes versicolor</i> en funda</i>	33
Tabla 9. <i>Resultados del análisis de varianza factorial para el porcentaje de colonización micelial de <i>Trametes versicolor</i> en placa al día 4 de incubación</i>	38
Tabla 10. <i>Análisis de varianza factorial 2×3 para la tasa de crecimiento micelial diario en placa</i>	39
Tabla 11. <i>Análisis de varianza factorial 2×3 para el porcentaje de colonización micelial de <i>Trametes versicolor</i> en bolsa</i>	41
Tabla 12. <i>Agrupación de medias mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey para el porcentaje de colonización de <i>Trametes versicolor</i> en bolsa</i>	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Crecimiento micelial de Trametes versicolor en sustratos formulados con bagazo de caña y aserrín (T1, T2 y T3).....</i>	27
Figura 2. <i>Crecimiento micelial de Trametes versicolor en sustratos formulados con rastrojo de maíz y aserrín (T4, T5 y T6).....</i>	27
Figura 3. <i>Porcentaje de colonización micelial de Trametes versicolor en placa al día 4 de incubación..</i>	38
Figura 4. <i>Medias e intervalos de confianza (95%) de la tasa de crecimiento micelial diaria de Trametes versicolor según la concentración de residuo agrícola.....</i>	40
Figura 5. <i>Intervalos de confianza simultáneos de Tukey (95%) para las diferencias de medias del porcentaje de colonización micelial de Trametes versicolor en bolsa.....</i>	43

RESUMEN EJECUTIVO

Los residuos agrícolas de maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) representan una biomasa lignocelulósica abundante y subutilizada en Ecuador, cuya valorización mediante el cultivo de hongos medicinales constituye una alternativa biotecnológica de alto impacto. Mediante un diseño con dos factores: tipo de residuo agrícola (maíz y caña de azúcar) y proporción del material estructural (25, 50 y 75 por ciento), se generaron seis tratamientos (T1 a T6) con tres réplicas cada uno, empleando como organismo modelo *Trametes versicolor*, basidiomiceto con capacidad de degradar lignina mediante un sistema enzimático extracelular que incluye lacasa, manganeso peroxidasa (MnP) y lignina peroxidasa (LiP); los sustratos fueron preparados mediante troceado, hidratación al 85 por ciento de humedad, ajuste de pH entre 4.5 y 6.5, y esterilización a 121 grados Celsius durante 90 minutos, antes de ser inoculados con micelio de *T. versicolor*; las variables de respuesta fueron velocidad y porcentaje de colonización micelial, analizadas mediante ANOVA de dos vías y prueba de Tukey HSD (p menor a 0.05). Los resultados mostraron que el tipo de residuo agrícola y la proporción de material estructural influyeron significativamente en la colonización micelial de *T. versicolor*, siendo los sustratos de maíz con mayor proporción de aserrín los más adecuados para el desarrollo del hongo bajo las condiciones evaluadas; estos resultados sientan las bases para el desarrollo de protocolos de producción de *T. versicolor* a partir de subproductos agroindustriales locales, con potencial aplicación en biotecnología ambiental.

PALABRAS CLAVE: *Trametes versicolor*, residuos lignocelulósicos, colonización micelial, sustratos agrícolas, biodegradación de lignina.

ABSTRACT

Agricultural residues from maize (*Zea mays*) and sugarcane (*Saccharum officinarum*) represent an abundant and underutilized lignocellulosic biomass in Ecuador, whose valorization through the cultivation of medicinal fungi constitutes a high-impact biotechnological alternative. Using a design with two factors: type of agricultural residue (maize and sugarcane) and proportion of structural material (25, 50 and 75 percent), six treatments (T1 to T6) were generated with three replicates each, employing *Trametes versicolor* as the model organism, a basidiomycete capable of degrading lignin through an extracellular enzymatic system that includes laccase, manganese peroxidase (MnP) and lignin peroxidase (LiP); substrates were prepared by chopping, hydration to 85 percent moisture, pH adjustment between 4.5 and 6.5, and sterilization at 121 degrees Celsius for 90 minutes, before being inoculated with *T. versicolor* mycelium; response variables were mycelial colonization rate and percentage, analyzed by two-way ANOVA and Tukey HSD test (p less than 0.05). Results showed that both the type of agricultural residue and the proportion of structural material significantly influenced mycelial colonization of *T. versicolor*, with maize-based substrates containing a higher proportion of sawdust proving most suitable for fungal development under the evaluated conditions; these findings lay the groundwork for the development of sustainable production protocols for *T. versicolor* from local agroindustrial byproducts, with potential application in environmental biotechnology.

KEYWORDS: *Trametes versicolor*, lignocellulosic residues, mycelial colonization, agricultural substrates, lignin biodegradation.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Justificación del problema

La producción agrícola de maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) genera grandes volúmenes de residuos orgánicos, tales como rastrojos, hojas, bagazo y otros subproductos lignocelulósicos que, en muchos casos, no reciben un manejo adecuado (**Ramos et al., 2022**). En el contexto ecuatoriano, estos cultivos poseen una gran relevancia económica y productiva, lo que implica la generación de residuos, cuya disposición final suele realizarse mediante prácticas como la quema, el enterramiento o la acumulación a cielo abierto, generando impactos ambientales negativos, incluyendo contaminación del suelo y del agua, emisión de gases de efecto invernadero, proliferación de plagas y riesgos sanitarios asociados a la descomposición orgánica (**Vega Leyva, 2025**).

Esta problemática pone de manifiesto la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles que permitan transformar estos residuos agrícolas en recursos de valor agregado, contribuyendo al mismo tiempo a la reducción de los impactos ambientales derivados de su manejo inadecuado. En este sentido, la biotecnología ofrece herramientas eficientes para la valorización de biomasa residual, particularmente a través del uso de microorganismos capaces de degradar materiales lignocelulósicos con estructuras complejas (**Díaz et al., 2022**).

Entre estos microorganismos, los hongos ligninolíticos, especialmente los de pudrición blanca como *Trametes versicolor*, han demostrado en diferentes investigaciones, su capacidad para degradar materiales lignocelulósicos como lignina, celulosa y hemicelulosa, gracias a la producción de enzimas ligninolíticas y metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes, antimicrobianas y catalíticas (**Atiwesh et al., 2022**). Asimismo, estudios previos han evidenciado que el crecimiento de estos hongos sobre residuos agrícolas puede modificar la composición estructural del sustrato, mejorar su biodegradabilidad y generar compuestos de interés biotecnológico (**García Baltazar, 2024**).

A pesar de este potencial, el uso sistemático de residuos agrícolas de maíz y caña de azúcar como sustratos para el cultivo de *Trametes versicolor* aún es limitado, especialmente en contextos locales como el ecuatoriano, donde existe abundante disponibilidad de estos materiales lignocelulósicos (**Ruiz et al., 2024**). En consecuencia, surge la necesidad de realizar estudios experimentales que permitan evaluar la aptitud de dichos residuos como sustratos para el desarrollo de hongos ligninolíticos.

Bajo este escenario, la presente investigación se orienta a evaluar el potencial de los residuos agrícolas de maíz y caña de azúcar como sustratos para el cultivo de *Trametes versicolor*, analizando su capacidad para favorecer el crecimiento y la colonización del hongo en diferentes formulaciones residuales. Asimismo, los resultados de este estudio permitirán generar información científica sobre el

aprovechamiento biotecnológico de biomasa lignocelulósica disponible localmente, contribuyendo así en el desarrollo de estrategias de economía circular y al manejo sostenible y eficiente de residuos agrícolas.

1.1.2. Residuos lignocelulósicos

1.1.2.1 Definición y contexto ecuatoriano

Los residuos lignocelulósicos son materiales resultantes del procesamiento de cultivos, vegetales, madera, alimentos, etc., que, comúnmente, son desechados por su propietario o poseedor. Estos materiales provienen de industrias agrícolas, forestales y agroindustriales, los cuales generan volúmenes considerables de residuos, cuya clasificación varía según la misma actividad que los genera, incluyendo rastrojos, paja, tallos, cáscaras, bagazo, aserrín, pulpa, ramas, etc. **(Ocampo, 2021)**.

Según el **SIPA (2024)**, en el año 2024, en el Ecuador, se produjeron alrededor de 1.7 millones de toneladas de maíz y 6.3 millones de toneladas de caña de azúcar, tanto para consumo nacional como internacional, los cuales dejaron aproximadamente del 25 al 35% de su peso como residuo, el cual generalmente no fue aprovechado de forma eficiente y por el contrario pudo generar impactos ambientales negativos **(Riera et al., 2024)**. En este contexto, estos residuos sobrantes representan una fuente de compuestos lignocelulósicos abundante y de bajo costo, lo que los convierte en una fuente potencial de carbono para aplicaciones biotecnológicas orientadas a la valorización de biomasa residual.

1.1.2.2 Composición química

Los residuos lignocelulósicos están compuestos por una compleja estructura matricial en la que las paredes celulares vegetales están constituidas por tres polímeros macromoleculares (lignina, celulosa y hemicelulosa), las cuales se encuentran organizados en una estructura tridimensional que aumenta la dificultad para su transformación, donde la hemicelulosa rodea las microfibrillas de celulosa, mediante enlaces de hidrógeno con la celulosa y enlaces covalentes con la lignina, limitando el contacto con el entorno externo.

La lignina es un polímero complejo y heterogéneo que presenta una estructura atípica y sin unidades repetibles, está formada por la polimerización de alcoholes fenólicos como el p-cumarílico, coniferílico y sinapílico; esta variabilidad y estructura, le confiere rigidez y resistencia a la pared celular, dificultando la degradación biológica de biomasa. Por su parte, la celulosa es un polisacárido constituido por unidades de glucosa, las cuales se encuentran unidas por enlaces β -1,4, que se organizan en microfibrillas las cuales presentan regiones cristalinas (resistentes a hidrólisis química y biológica) y amorfas (accesibles y reactivas), siendo las segundas quienes influyen directamente en la biodegradación de la biomasa. Por último, la hemicelulosa es un conjunto heterogéneo de polisacáridos

compuestos por diversos monosacáridos como glucosa, xilosa, arabinosa, manosa y galactosa, presentan una estructura ramificada y menos resistente que la celulosa, lo que facilita su degradación y transformación en azúcares simples (Cazier et al., 2024).

1.1.2.3 Importancia biotecnológica

Según Nair & Verma (2025), la gran disponibilidad de biomasa lignocelulósica como rastrojos de maíz, bagazo de caña, pajas de cereales, residuos de café, etc., generados por diversas actividades agrícolas, forestales y agroindustriales, la convierte en una opción viable como materia prima renovable, con gran potencial biotecnológico, la cual puede contribuir al desarrollo de procesos más sostenibles y a la reducción del impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos.

En el área de la biorrefinería, estos residuos pueden ser transformados mediante procesos químicos, enzimáticos o microbiológicos para la producción de biocombustibles, como bioetanol e hidrógeno, así como para la obtención de azúcares fermentables que sirven como sustratos en diferentes procesos. Además, esta biomasa permite la extracción de compuestos bioactivos, como compuestos fenólicos con actividad antioxidante, los cuales poseen aplicaciones potenciales en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. Por otro lado, estos materiales también pueden ser usados para el desarrollo de nuevos biomateriales y productos sostenibles, incluyendo biocompuestos, biosorbentes para la eliminación de materiales pesados, biocarbones con propiedades adsorbentes y materiales reforzados con fibras naturales (Rodríguez et al., 2023).

En conjunto, la valorización biotecnológica de biomasa residual lignocelulósica constituye una estrategia clave dentro del modelo de biotecnología circular, ya que permite transformar subproductos agrícolas y forestales en recursos útiles, reduciendo el impacto ambiental y promoviendo procesos industriales más sostenibles.

1.1.3. Residuos de maíz y caña de azúcar

1.1.3.1 Características de *Zea mays*

El maíz (*Zea mays*) es una gramínea de origen mesoamericano que, actualmente, constituye uno de los cultivos más importantes y de mayor producción en el mundo; durante su cosecha, se generan grandes cantidades de residuos agrícolas conocidos como rastrojos, que incluyen tallos, hojas, brácteas y mazorca, estimando que por cada tonelada de grano cosechado se generan entre 1 y 2 toneladas de rastrojo. Estructuralmente, el maíz tiene una composición aproximada de 30–40% de celulosa, 20–30% de hemicelulosa y 15–20% de lignina, lo que evidencia su potencial como sustrato para procesos

biotecnológicos, aunque su estructura requiere acondicionamientos previos para facilitar la accesibilidad a los polisacáridos fermentables (**Hernández, 2025**).

La disponibilidad de estos residuos en la región interandina del país, especialmente en las provincias de Tungurahua, Cotopaxi y Chimborazo, es estacional y masiva, lo que garantiza su accesibilidad para estudios y aplicaciones biotecnológicas a nivel local.

1.1.3.2 Características de *Saccharum officinarum*

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una gramínea de origen asiático, cultivada en regiones tropicales y subtropicales debido a su alto contenido de sacarosa. En Ecuador, su cultivo se centra en las provincias costeras e interandinas y, durante su procesamiento industrial, se genera el bagazo de caña como principal residuo sólido, representando entre el 25 y 30% del total del peso de la caña procesada, además de otros residuos como el cogollo, la cachaza y el melote. El bagazo está compuesto aproximadamente por 40–50% de celulosa, 20–25% de hemicelulosa y alrededor del 10% de lignina (**Lagos Burbano et al., 2022**).

Su elevado contenido de celulosa, su estructura fibrosa, su bajo costo y su disponibilidad, convierten a este residuo en un gran potencial para diversas aplicaciones, tales como el cultivo de hongos, combustible para procesos industriales, materia prima para la industria papelera, producción de biocombustibles, biomateriales y otros productos de valor agregado (**Resano et al., 2022**). Sin embargo, una parte importante de este residuo continúa destinándose a aplicaciones de bajo valor o es descartada, por lo que resulta necesario promover investigaciones orientadas a su valorización y aprovechamiento sostenible.

1.1.4. Sustratos para cultivo fúngico

1.1.4.1 Propiedades fisicoquímicas y estructurantes.

El sustrato juega un papel crucial en el cultivo de hongos, ya que afecta directamente al desarrollo del micelio, la producción de cuerpos fructíferos y la calidad del hongo. Factores como la humedad, el pH, la estructura del sustrato y su contenido de nutrientes son determinantes para su correcto desarrollo, colonización y fructificación.

Según **Desisa et al. (2024)**, la humedad debe mantenerse en niveles óptimos para favorecer la actividad del micelio, pero sin llegar a un nivel en el cual se promueva la aparición de contaminantes, siendo un rango óptimo entre 60 a 70% para la colonización y mayor al 85% para la fructificación; mientras que para el caso del pH, su rango óptimo sería entre 4,5 y 6,5; por último, al igual que en el caso de la

humedad, los rangos de temperatura varían de acuerdo a la fase que se lleve a cabo, para la colonización el rango es de 23 – 27 °C y para la inducción de la fructificación de 10 a 20 °C.

La estructura física del sustrato cumple una función determinante en el desarrollo de hongos, ya que debe permitir una adecuada aireación y circulación de oxígeno que favorezca el crecimiento micelial; sustratos excesivamente compactos inhiben la penetración del micelio, mientras que aquellos demasiado sueltos no proporcionan el soporte estructural necesario para una colonización uniforme (**Thakur, 2020**). Asimismo, la granulometría del sustrato (tamaño de las partículas que lo componen) resulta igualmente crítica, pues partículas demasiado grandes dificultan la distribución homogénea de la humedad e impiden una colonización eficiente, en cambio, partículas excesivamente finas tienden a retener humedad en exceso, favoreciendo la aparición de contaminantes y mohos competidores (**Mixquititla-Casbis et al., 2022**); por ello, es recomendable que los sustratos se encuentren en fragmentos de aproximadamente 1 a 3cm, medida que favorece las condiciones descritas de humedad y aireación.

Por otro lado, desde el punto de vista nutricional, la composición química del sustrato también es fundamental para el éxito del cultivo. En este aspecto, la relación carbono/nitrógeno (C/N) constituye uno de los parámetros más relevantes, ya que en el caso de los hongos ligninolíticos, estos requieren una amplia fuente de carbono para sostener su metabolismo energético y una cantidad suficiente de nitrógeno para la síntesis de proteínas, enzimas y ácidos nucleicos; una relación superior a 80, limita el crecimiento por deficiencia de nitrógeno, mientras que una relación C/N demasiado baja puede generar exceso de nitrógeno inorgánico, el cual inhibe la producción de enzimas ligninolíticas (**Han et al., 2024**); en este caso, se recomienda un C/N entre 25 y 60, el cual puede ser ajustado mediante la adición de otros materiales estructurantes o la adición de suplementos nitrogenados.

1.1.4.2 Preparación, esterilización y tratamiento

La preparación adecuada del sustrato constituye una etapa determinante en el éxito del cultivo fúngico, ya que de ella depende la disponibilidad de nutrientes y la ausencia de microorganismos competidores que puedan comprometer la colonización micelial; este proceso comprende una secuencia de etapas interrelacionadas que van desde el acondicionamiento físico del material, hasta los tratamientos térmicos previos a la inoculación.

La etapa inicial corresponde al secado del material a una temperatura aproximada de 50 °C, proceso que permite reducir el contenido de humedad del material en bruto y previene el desarrollo prematuro de microorganismos durante el almacenamiento; posteriormente, la reducción del tamaño del material lignocelulósico mediante trituración o molienda, permite obtener un tamaño de partícula homogéneo que facilita la penetración del micelio y la distribución uniforme de la humedad. Las partículas

demasiado grandes dificultan la colonización, mientras que otras demasiado finas pueden retener la humedad en exceso favoreciendo la aparición de contaminantes **(Vengoechea, 2022)**. Luego de este procedimiento, se realiza una mezcla entre el sustrato y el material estructurante, el cual sirve para darle un mayor soporte estructural, esta mezcla debe ser homogenizada previo a su rehidratación.

Una vez constituida la mezcla, se procede al ajuste de humedad, el cual, para hongos de pudrición blanca, debe situarse entre el 60 y 70% en peso húmedo, favoreciendo la actividad enzimática ligninolítica, así como la transferencia de gases al interior del sustrato; un contenido hídrico menor limita el metabolismo fúngico, mientras que uno mayor genera condiciones anaeróbicas que favorecen el desarrollo bacteriano y la producción de compuestos inhibidores **(Jović et al., 2020)**. Por último, previo a la inoculación, el sustrato debe someterse a un tratamiento de esterilización, el cual consiste en exponer al sustrato a vapor saturado a presión en autoclave, comúnmente a 121 °C con una presión de 15 psi durante una hora; este tratamiento elimina la totalidad de microorganismos presentes, incluyendo esporas bacterianas y fúngicas de alta resistencia térmica **(Quiñones Cerna et al., 2025)**.

En conjunto, el objetivo central de todos estos tratamientos es eliminar la carga de microorganismos competidores (bacterias u hongos contaminantes), que pudieran desplazar al micelio durante la fase de colonización y; modificar la estructura fisicoquímica del sustrato, de modo que los polímeros lignocelulósicos sean más accesibles al sistema enzimático del hongo, acortando el periodo de colonización e incrementando la eficiencia biológica del cultivo.

1.1.4.3 Potencial del maíz y caña como sustratos

La naturaleza lignocelulósica de los residuos de maíz y caña de azúcar los convierte en sustratos idóneos para el cultivo de hongos con capacidad degradativa, particularmente hongos basidiomicetos de pudrición blanca. Estos residuos, ricos en polisacáridos estructurales, proporcionan el soporte físico necesario para el establecimiento de redes hifales, además de constituir una fuente de carbono y energía para el metabolismo fúngico **(Melo Parra, 2021)**.

Ambos sustratos, aunque comparten su naturaleza lignocelulósica, difieren significativamente en las proporciones de cada compuesto y sus propiedades estructurales **(Tabla 1)**; la distribución de estos compuestos varía entre especies e influye directamente en su potencial como sustratos para el cultivo de hongos. Esta variación es particularmente relevante en el caso de los hongos de pudrición blanca, cuyos metabolismos están adaptados a la degradación selectiva de la lignina, un sustrato con mayor proporción de este polímero puede favorecer la inducción de enzimas ligninolíticas, mientras que uno con menos cantidad puede favorecer una colonización más rápida debido a la menor presencia de resistencia estructural.

Tabla 1.*Comparación del potencial como sustratos fúngicos de maíz y caña de azúcar.*

Parámetro	Residuos de maíz	Residuos de caña	Implicación fúngica
Fracción	Rastrojo	Bagazo	Subproductos de cosecha de bajo costo y alta disponibilidad
Celulosa (%)	30 - 40	40 – 50	Fuente de carbono estructural
Hemicelulosa (%)	20 – 30	20 – 25	Degradación precedente a la de la celulosa
Lignina (%)	15 - 20	10	Mayor cantidad de lignina puede favorecer la inducción de enzimas ligninolíticas
Relación C/N	Alta (> 60–80)	Media (> 40–60)	Mayor a 30, proceso lento y con baja disponibilidad de N
pH inicial	5,5 - 7	4,5 - 6	Hongos de pudrición blanca crecen bien entre 4,5 – 6,5
Retención de humedad	Media, estructura heterogénea	Alta porosidad, mayor retención de humedad y aireación	El bagazo favorece el balance hídrico y el rastrojo mejora la aireación en mezclas
Estructura física	Fibrosa y compacta	Fibrosa y esponjosa, con baja densidad	Óptima porosidad y contacto del micelio con el sustrato
Compuestos inhibidores	Bajos niveles de fenoles ligados a la lignina	Alto contenido de fenoles, puede causar efectos fitotóxicos	La esterilización y el metabolismo fúngico degradan estos compuestos

Parámetro	Residuos de maíz	Residuos de caña	Implicación fúngica
Ventaja principal	Mayor inducción enzimática por lignina	Mayor retención de humedad	Óptimos sustratos fúngicos
Limitación principal	Mayor resistencia estructural a la colonización inicial	Menor lignina disponible y compuestos fenólicos	Limitaciones mitigadas con pretratamiento y ajuste de formulación

Nota. Información obtenida de **Resano et al., 2022, Lagos Burbano et al., 2022 y Hernández, 2025.**

Investigaciones realizadas con especies de los géneros *Pleurotus* y *Trametes* han reportado incrementos en la tasa de crecimiento micelial, actividad enzimática y eficiencia de biodegradación cuando se emplean estos residuos como sustratos. Además, se ha observado que la combinación de residuos agrícolas puede mejorar la aireación, la estructura física del sustrato y el balance nutricional, optimizando así el desempeño fúngico (**Kyawt et al., 2024**).

Desde una perspectiva de valorización de residuos, ambos materiales ofrecen ventajas adicionales: son abundantes, de bajo costo y ampliamente disponibles en el contexto ecuatoriano. Su aprovechamiento como sustratos fúngicos representa además una alternativa de economía circular frente a prácticas como la quema en campo o la disposición sin tratamiento, con impacto ambiental significativo (**Desisa et al., 2024**); la combinación de estos sustratos con materiales estructurantes en diferentes proporciones podría contribuir a mejorar las propiedades físicas y nutricionales del sustrato, favoreciendo potencialmente el crecimiento y desarrollo de hongos lignocelulíticos.

1.1.5. Hongos ligninolíticos y de pudrición blanca

Los hongos ligninolíticos constituyen el grupo de microorganismos más relevante en la degradación natural de biomasa vegetal; actualmente, su estudio ha cobrado gran interés en el ámbito biotecnológico, esto debido a su particular característica para la mineralización de la lignina, el polímero aromático más recalcitrante de la pared celular vegetal. Desde el punto de vista taxonómico y funcional, los hongos xilófagos se clasifican en dos grupos, de acuerdo a su patrón de descomposición, hongos de pudrición parda o marrón y hongos de pudrición blanca; su principal diferencia radica en su mecanismo de degradación ya que, la podredumbre blanca se fundamenta en la hidrólisis enzimática, a diferencia de la podredumbre parda en la cual se realiza una modificación de la lignina mediante la química de Fenton

y especies reactivas de oxígeno para luego llevar a cabo una hidrólisis enzimática, degradando preferencialmente la celulosa y la hemicelulosa (**Morales et al., 2023**).

La colonización de la lignocelulosa en la naturaleza se produce principalmente por hongos basidiomicetos, particularmente, los xilófagos de podredumbre blanca que obtienen su nombre por el aspecto blanquecino que adquiere el sustrato afectado, como consecuencia de la eliminación preferencial de la lignina oscura, dejando expuesta la celulosa de color blanco (**Camacho Morales et al., 2017**), esta característica distingue a este tipo de hongos de otros grupos fúngicos y los posiciona como organismos clave tanto en el ciclo del carbono como en diversas aplicaciones industriales. Entre los géneros más representativos se encuentran *Trametes*, *Pleurotus*, *Ganoderma*, *Phanerochaete*, *Sterum*, *Lentinula* y *Bjerkandera*; su rol ecológico es fundamental en el ciclo del carbono forestal, ya que son los principales descomponedores de madera muerta, por ende, sin su actividad, la lignina se acumularía en el suelo de forma indefinida interrumpiendo el ciclo de los nutrientes (**Belito et al., 2024**); es por ello que estos microorganismos representan una gran herramienta biotecnológica, tanto para procesos de biorremediación de contaminantes orgánicos y la producción de enzimas industriales.

1.1.6. *Trametes versicolor*

1.1.6.1 Características generales y taxonómicas

Trametes versicolor es un hongo basidiomiceto, que se encuentra comúnmente en las regiones de Asia, América y Europa. Presenta cuerpos fructíferos con bandas concéntricas de colores variados, lo que le otorga su nombre común de “cola de pavo”, además de presentarse en forma semicircular con diámetros de entre 3 a 10 cm. Su fisiología, versatilidad enzimática y robustez lo convierten en un modelo ideal para estudios de biodegradación.

Taxonómicamente, *Trametes versicolor* se ubica dentro del reino fungi, caracterizado por organismos eucariotas heterótrofos que absorben nutrientes del medio; pertenece al filo Basidiomycota, grupo que incluye hongos con basidios donde se producen las basidiosporas. Se clasifica dentro de la clase Agaricomycetes, la cual reúne la mayoría de los hongos formadores de setas; a nivel de orden, forma parte de Polyporales, conocidos por sus cuerpos fructíferos poroides y su capacidad de degradar madera; es miembro de la familia Polyporaceae, que agrupa hongos de pudrición blanca, y finalmente se ubica en el género *Trametes*, reconocido por sus basidiomas en forma de concha o abanico con bandas de colores. Su denominación científica completa es *Trametes versicolor* (L.) Lloyd, haciendo referencia a su típica variación de tonalidades (**Justo & Hibbett, 2011**) y (**Trametes versicolor, 2020**).

1.1.6.2 Mecanismos y enzimas de degradación

Trametes versicolor es reconocido como uno de los hongos de pudrición blanca con mayor capacidad ligninolítica documentada; su sistema enzimático está dominado por la producción de múltiples isoformas de lacasa, que le confieren una notable eficiencia en la degradación de la lignina y compuestos xenobióticos de estructura fenólica similar.

La degradación de la biomasa lignocelulósica es un proceso secuencial y coordinado que empieza con la penetración del micelio en el material lignocelulósico, a través de las hifas, seguido por la secreción de un sistema enzimático extracelular de naturaleza oxidativa cuya principal característica es su baja especificidad por el sustrato, lo que confiere un amplio espectro de acción sobre compuestos que contengan una estructura similar a la lignina. Durante este proceso, se combinan la acción de enzimas oxidativas e hidrolíticas que operan de forma sinérgica sobre los tres polímeros principales del complejo lignocelulósico (lignina, celulosa y hemicelulosa).

Según **Diosma et al. (2025)**, la degradación de la lignina es el paso más complejo y determinante del proceso, ya que esta es una molécula altamente resistente a la hidrólisis convencional; los hongos de pudrición blanca emplean un mecanismo oxidativo no específico, basado en la generación de radicales libres mediante peroxidasas dependientes de peróxido de hidrógeno, el cual, fragmenta los enlaces C-C y C-O del polímero lignínico, produciendo compuestos de menor peso molecular que puedan ser asimilados como fuente de carbono; entre las principales enzimas que actúan de forma directa o indirecta sobre la lignina se encuentran la lignina peroxidasa (LiP), la manganeso peroxidasa (MnP) y la lacasa, conocidas colectivamente como ligninasas cuyo mecanismo de acción se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Mecanismo de acción de las ligninasas

Enzima	EC	Tipo de reacción	Cofactor requerido	Rol en la degradación de lignina	Presencia en <i>Trametes versicolor</i>
Lignina peroxidasa	1.11.1.14	Oxidación directa de estructuras aromáticas no fenólicas	H ₂ O ₂	Rompe enlaces complejos de lignina mediante radicales catiónicos de alto potencial redox.	Puede actuar como enzima complementaria
Manganeso peroxidasa	1.11.1.13	Oxidación indirecta	H ₂ O ₂ y Mn ²⁺	Genera Mn ³⁺ como mediador difusible	Presente en la mayoría de

Enzima	EC	Tipo de reacción	Cofactor requerido	Rol en la degradación de lignina	Presencia en <i>Trametes versicolor</i>
		mediada por Mn ³⁺		que oxida estructuras fenólicas de lignina.	basidiomicetos de pudrición blanca.
Lacasa	1.10.3.2	Oxidación de compuestos fenólicos y no fenólicos con reducción de O ₂ a H ₂ O	Iones de cobre en su centro activo (T1, T2 y T3)	Oxidación directa de compuestos aromáticos y formación de radicales que facilitan la despolimerización de la lignina.	Enzima predominante, presenta múltiples isoformas.

Nota. Información obtenida de (Singh et al., 2024) y (Vandelook et al., 2024)

Asimismo, la síntesis y secreción de enzimas ligninolíticas al medio extracelular ocurre cuando existen niveles limitados de carbono o nitrógeno, mientras que su producción es óptima cuando existe una alta presencia de oxígeno (Diosma et al., 2025). Esta regulación metabólica implica que relaciones C/N bajas asociadas a un exceso de nitrógeno puede inhibir paradójicamente la actividad ligninolítica, por ello la importancia de la selección y formulación mezclas de los residuos agrícolas como sustratos.

Simultáneamente a la degradación de la lignina, la celulosa es hidrolizada por un conjunto sinérgico de celulasas entre las que se incluyen endoglucanasas, exoglucanasas y β -glucosidasas. Estas enzimas participan en la conversión de la cadena celulósica en glucosa asimilable mediante diferentes mecanismos: las endoglucanasas hidrolizan aleatoriamente los enlaces glucosídicos internos de las celulosas; las exoglucanasas liberan celobiosa o glucosa desde los extremos reductores y no reductores de la cadena; y las β -glucosidasas transforman la celobiosa y otros oligosacáridos solubles en glucosa. De forma paralela, la hemicelulosa es degradada por enzimas hemicelulolíticas, principalmente xilanasas y mananasas, las cuales liberan los azúcares que conforman esta fracción estructural de la pared celular vegetal (Diosma et al., 2025). La acción coordinada de estos sistemas enzimáticos permite la degradación progresiva de la biomasa lignocelulósica, y la liberación de compuestos que pueden ser utilizados como fuente de carbono y energía por el hongo. Como resultado, se favorecen procesos esenciales para su desarrollo, incluyendo el crecimiento micelial, la colonización del sustrato y, bajo condiciones adecuadas, la formación de cuerpos fructíferos.

1.1.6.3 Aplicaciones

Debido a su singular sistema enzimático, *Trametes versicolor* es considerada una de las especies fúngicas con mayor versatilidad biotecnológica, lo que le confiere un amplio espectro de aplicaciones:

Desde el punto de vista industrial, las lacasas y peroxidasas producidas por *T. versicolor* tienen gran aplicación en la industria papelera, donde su capacidad despolimerizante sobre la lignina permite el blanqueado biológico de la pulpa de Kraft, haciendo este proceso menos dependiente de compuestos clorados contaminantes (**Castro Torres, 2022**); por otro lado, la lacasa, al reducir el oxígeno molecular a agua y oxidar diversos compuestos aromáticos orgánicos e inorgánicos, es de gran utilidad en el tratamiento y decoloración de efluentes contaminados con colorantes procedentes de la industria textil, un sector que genera una de las corrientes de agua residual más complejas y difíciles de tratar mediante métodos convencionales (**Vallejo, 2021**). En este contexto, estudios recientes confirman que la degradación enzimática de colorantes de dispersión y otros tintes recalcitrantes con *T. versicolor* puede alcanzar eficiencias superiores al 80%, posicionando a este hongo como una herramienta biotecnológica de alto valor para la industria textil (**Atilano-Camino et al., 2020**).

Asimismo, la baja especificidad del sistema enzimático de *T. versicolor*, le permite actuar sobre una amplia gama de contaminantes orgánicos de estructura similar a la lignina como hidrocarburos en suelos y aguas, donde se ha demostrado mediante técnicas de bioaugmentación y bioestimulación su capacidad de consumir y degradar entre un 30 y 50% de hidrocarburos totales del petróleo (**Jimenez, 2018**). Otros estudios han evaluado las lacasas producidas por este hongo como agente para el tratamiento y eliminación de contaminantes ambientales e industriales tanto por su capacidad de degradación de la lignina y de compuestos fenólicos, siendo de gran utilidad en la degradación de colorantes, la biorremediación de algunos residuos químicos tóxicos, como compuestos aromáticos clorados y pesticidas, y el desarrollo de biosensores (**Acosta Peñaloza, 2022**).

Por otro lado, en el campo médico, *T. versicolor* es la fuente de los polisacáridos bioactivos terapéuticos, como el polisacárido-k (PSK o Krestin) y polisacárido péptido (PSP), ambos de naturaleza glucoproteica, extraídos de diferentes cepas del hongo: la cepa "CM-101" para el PSP en China y la cepa "Cov-1" para el PSK en Japón. Estos actúan como moduladores del sistema inmunológico y como agentes preventivos contra el cáncer, inhibiendo el crecimiento celular en células tumorales (Torres Vinuesa & Carem Francelys, 2025). Asimismo, estos compuestos bioactivos han demostrado otros efectos inmunológicos como la activación del sistema reticuloendotelial, la modulación de citotoxinas, la mejora de la viabilidad de las células dendríticas, la maduración de las células T y la producción de anticuerpos con efectos antitumorales y anticancerígenos (**Valerio Vega & Montoya, 2024**).

1.1.7. Parámetros de evaluación del cultivo fúngico

La evaluación del rendimiento productivo de *Trametes versicolor* sobre los sustratos lignocelulósicos requiere el seguimiento sistemático de un conjunto de parámetros que permiten cualificar su desempeño en cada etapa de desarrollo, desde la colonización inicial hasta la formación y cosecha de los cuerpos fructíferos; constituyendo los criterios objetivos sobre los cuales se sustenta la comparación estadística entre formulaciones de sustrato.

1.1.7.1 Crecimiento micelial

El crecimiento micelial es el parámetro de evaluación más temprano y directo en el proceso de cultivo de hongos en sustrato sólido, hace referencia a la velocidad y extensión con la que el micelio coloniza el sustrato a través de la elongación de sus hifas, y su medición permite comparar la compatibilidad de distintas formulaciones de sustrato con el hongo cultivado. Este proceso puede evaluarse de dos formas, en cultivos en placa Petri con medio de agar, el crecimiento micelial se evalúa mediante la medición de los milímetros de diámetro colonizado por día, hasta la colonización completa, posterior a esto, se obtiene la tasa de crecimiento diario (TDC), la cual se calcula tomando los diámetros (mm) de crecimiento micelial de la colonia fúngica del día inicial y final, dividido para la diferencia entre el tiempo transcurrido (días), permitiendo la construcción de curvas de crecimiento (Muñoz Castillo, 2020). Por otro lado, en cultivos en sustrato sólido (bolsas o frascos), el avance del micelio se evalúa visualmente estimando el porcentaje de volumen colonizado del bloque de sustrato los indicadores cualitativos incluyen la densidad, homogeneidad, color y presencia de exudados o pigmentaciones que pueden indicar estrés o contaminación.

1.1.7.2 Colonización

La colonización del sustrato hace referencia al proceso mediante el cual el micelio invade progresivamente el sustrato, penetrando a través de una red de hifas y secretando enzimas que degradan polímeros lignocelulósicos para la obtención de nutrientes, esta etapa es indispensable para el inicio de la fructificación en hongos que producen cuerpos fructíferos macroscópicos. El porcentaje de colonización se expresa como la proporción de volumen del sustrato cubierta por el micelio en un tiempo determinado y se evalúa mediante la observación visual directa o fotográfica.

La velocidad de colonización está determinada por la interacción entre las propiedades del sustrato (composición, pH, humedad, densidad) y las características de la cepa fúngica utilizada. Sustratos con alta proporción de celulosa disponible y relación C/N adecuada tienden a colonizarse más rápidamente, mientras que sustratos con alta concentración de lignina o compuestos inhibidores pueden retrasar el proceso (Alaneme et al., 2023).

1.1.7.3 Eficiencia biológica y fructificación

La eficiencia biológica (EB) es el indicador de productividad más utilizado en el cultivo de hongos en sustrato sólido. Este representa la relación entre el peso fresco de los cuerpos fructíferos cosechados y el peso seco del sustrato utilizado, expresada como porcentaje. Su fórmula es:

$$EB (\%) = \left(\frac{\text{Peso fresco de cuerpos fructíferos}}{\text{Peso seco del sustrato}} \right) \times 100$$

Los valores de eficiencia biológica superiores al 50% se consideran buenos para la mayoría de las especies comestibles, aunque en hongos medicinales como *T. versicolor*, la evaluación del crecimiento micelial, la actividad enzimática y la producción de compuestos bioactivos suele ser más relevante que la producción de cuerpos fructíferos. La eficiencia biológica puede variar significativamente en función del sustrato, la cepa, el sistema de cultivo y las condiciones ambientales (Liang et al., 2025)

Por otra parte, la fructificación es la etapa del ciclo vital de los hongos en la que se forman los cuerpos fructíferos reproductivos, en *T. versicolor*, este proceso comprende varias etapas diferenciadas: formación de primordios (pequeñas estructuras blanquecinas que emergen de la superficie del sustrato colonizado), desarrollo del píleo (sombrero) con la diferenciación de bandas concéntricas características, maduración del himenio y liberación de basidiosporas (Fabros et al., 2023). La inducción de la fructificación requiere de un cambio en las condiciones ambientales, tales como la reducción de la temperatura, incremento de la humedad relativa, aumento de la ventilación y exposición a la luz difusa, estímulos que actúan como señales que desencadenan la transición del crecimiento vegetativo al reproductivo.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de los residuos agrícolas de maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como sustratos para el cultivo del hongo cola de pavo (*Trametes versicolor*).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas de maíz y caña de azúcar para determinar su idoneidad como sustratos lignocelulósicos.
- Evaluar el crecimiento y la colonización micelial de *Trametes versicolor* en diferentes formulaciones de sustratos elaborados a partir de residuos.
- Comparar estadísticamente las formulaciones de sustrato para identificar aquella que presenta las mejores condiciones para la colonización fúngica de *Trametes versicolor*.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

El presente trabajo de titulación fue de tipo experimental y se llevó a cabo en los laboratorios de la UODIDE de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. En la **Tabla 3**, se enlistan los reactivos, material fungible y equipos que se utilizaron durante la investigación.

Tabla 3.

Lista de reactivos y equipos utilizados.

Reactivos	
- Agar	- Glucosa
- Agua destilada	- Micelio de <i>Trametes versicolor</i>
- Aserrín	- PDA
- Bagazo de caña	- Residuos de maíz
Equipos	
- Autoclave	- Deshidratador
- Balanza	- Estufa
- Cabina de flujo laminar	- Incubadora
- Cabina de seguridad tipo II	- Refrigerador
- Cámara de germinación	- Termohigrómetro

Nota. Elaboración propia

2.2. Métodos

2.2.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas

2.2.1.1 Muestreo y caracterización fisicoquímica inicial

Los residuos agrícolas de maíz y caña de azúcar fueron recolectados de productores y vendedores locales, seleccionando únicamente residuos frescos, libres de moho, sin descomposición ni contaminación visible, siendo transportados hacia el laboratorio de trabajo en recipientes limpios y desinfectados para evitar contaminación cruzada.

En primer lugar, se obtuvo el peso húmedo inicial, para lo cual, se tomaron aproximadamente 10 gramos, tanto de maíz y de caña, como del material estructurante (aserrín) y se colocaron en una cápsula de porcelana previamente pesada, por triplicado; las cápsulas con los sustratos se trasladaron a una

estufa a 110 °C por 24 horas, hasta que se obtuvo un peso constante (Levicoy & Morales, 2023), posteriormente, se calculó su porcentaje de humedad utilizando la Ecuación 1.

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso humedo}} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Asimismo, para la determinación del pH, se suspendieron 5 gramos de cada material en 50 mL de agua destilada (1:10 p/v) y posteriormente, se midió el pH con un potenciómetro calibrado por triplicado. Adicionalmente, mediante una evaluación descriptiva, se registró el color, textura y estructura fibrosa de cada material, indicadores preliminares que sirvieron para identificar su aptitud como sustratos (Thompson et al., 2002).

Para una caracterización más completa de los materiales estudiados, se enviaron 10 g de cada muestra al Laboratorio de Control de Alimentos (LACONAL), donde mediante el método de Dumas se determinó el porcentaje de nitrógeno, proteína, grasa y cenizas. Método que consiste en la combustión completa de los materiales a altas temperaturas, donde los óxidos de nitrógeno son reducidos a N₂ molecular, el cual es cuantificado por conductividad térmica (Thompson et al., 2002).

2.2.1.2 Pretratamiento del material lignocelulósico

Los residuos de maíz y caña fueron triturados hasta obtener fragmentos de 1 a 3 cm, con el fin de mejorar su homogeneidad y facilitar la colonización micelial, posteriormente, estos fragmentos se trasladaron a un deshidratador a 50 °C por 24 horas, junto con el material estructurante (aserrín), para reducir su contenido de agua y tener un punto de partida para el siguiente proceso; el material seco se mantuvo en cajas de plástico cerradas, para evitar contaminación y, manteniendo la misma metodología del paso anterior, se midió la humedad y el pH de los materiales deshidratados.

2.2.1.3 Preparación del sustrato previo a la inoculación

Una vez deshidratado el maíz, la caña y el aserrín, se procedió a la preparación de los sustratos mediante la distribución proporcional de los residuos con el estructurante, estableciendo las siguientes proporciones: 25:75, 50:50 y 75:25 (residuo:estructurante, p/p), con tres réplicas por tratamiento, distribuyéndose de la siguiente forma: T1 (25% caña y 75% aserrín), T2 (50% caña y 50% aserrín), T3 (75% caña y 25% aserrín), T4 (25% maíz y 75% aserrín), T5 (50% maíz y 50% aserrín) y T6 (75% maíz y 25% aserrín); adicionando controles compuestos por el 100% del residuo agrícola y 100% del estructurante. Para su homogenización, cada mezcla fue dispuesta en gavetas plásticas, donde se incorporó 1.3 litros de agua potable por cada kilo de material o hasta alcanzar una humedad óptima determinada mediante la prueba táctil del puño, donde el sustrato se considera adecuado cuando al comprimirlo manualmente no existe escurrimiento de agua. Así mismo, se realizó un control de pH en

las mezclas, verificando que estas se encuentren en un rango de entre 6.0 y 6.5, para favorecer el crecimiento del hongo (Desisa et al., 2024).

Tras la homogenización y rehidratación de las mezclas de los sustratos, se procedió a pesar 300 g de cada tratamiento en una balanza y se distribuyeron en fundas de polipropileno de alta densidad resistentes al calor, siendo selladas herméticamente con sus respectivas tapas con filtro, para evitar contaminación cruzada durante su manipulación. Estas fundas fueron llevadas a esterilización en autoclave a 121 °C por 15 minutos, para la eliminación de microorganismos competidores, esporas fúngicas y endosporas bacterianas presentes en la biomasa lignocelulósica (Desisa et al., 2024). Una vez finalizado este ciclo, las fundas se retiraron de la autoclave y se dejaron en reposo hasta alcanzar la temperatura ambiente para posteriormente ser inoculadas.

2.2.2 Evaluación del crecimiento y colonización micelial de *Trametes versicolor*

2.2.2.1 Ensayo preliminar in vitro de crecimiento micelial

Con el objetivo de confirmar la capacidad de *Trametes versicolor* para degradar residuos lignocelulósicos y establecer una potencial curva de crecimiento micelial como referencia para la fase experimental principal, se realizó un ensayo in vitro, para lo cual, se preparó un medio de cultivo no definido experimental siguiendo las guías de Sidana & Farooq (2014) y Jasińska et al. (2017) donde se utilizaron 200 mL de agua destilada y 6 g de cada una de las mezclas (formulaciones evaluadas) trituradas y se homogenizaron en una licuadora, posteriormente, se añadió en un matraz 1,8 g de agar bacteriológico, 0,5 g de glucosa y 100 mL de la cada una de las mezclas con las formulaciones estudiadas; el matraz se llevó a una plancha de calentamiento a 251 °C con una agitación constante de 163 r.p.m., hasta ebullición; por último, cada una de las mezclas se colocaron en botellas y autoclavaron. Este medio permite la simulación de las condiciones nutricionales de cada formulación de sustrato en un sistema controlado, facilitando la observación directa del comportamiento micelial frente a la exposición a los dos materiales lignocelulósicos.

La inoculación se realizó colocando un fragmento de grano de trigo colonizado con micelio activo de *T. versicolor* en el centro de la placa Petri y se dejó en incubación a 30 °C; el crecimiento micelial fue registrado cada 24 horas mediante la medición del diámetro de la colonia en ejes horizontales y verticales, para obtener un diámetro promedio, a partir del cual se calculó el porcentaje de colonización de la superficie de la placa. El ensayo se realizó por triplicado y los datos registrados permitieron construir curvas de crecimiento micelial que relacionan el porcentaje de colonización en función del tiempo (días), constituyendo una herramienta diagnóstica para evaluar comparativamente la respuesta del microorganismo a cada sustrato.

2.2.2.2 Preparación del inóculo

El inóculo de *Trametes versicolor* utilizado para el presente estudio, fue adquirido de un proveedor especializado en la producción de hongos comestibles y medicinales “The Fungus Garden”, ubicado en Pifo - Ecuador; según las especificaciones técnicas proporcionados por el proveedor, el micelio fue propagado a partir de cultivos puros de *T. versicolor* en medio de cultivo PDA, a partir de los cuales se obtuvieron discos miceliales de aproximadamente 1 cm de diámetro, los cuales fueron transferidos a bolsas con una mezcla de grano de trigo y aserrín esterilizado como sustrato de soporte.

Para los fines de la presente investigación, se empleó una bolsa de 1 kg de inóculo en grano con colonización micelial completa, verificada visualmente por la presencia uniforme del micelio blanco algodonoso, característico de esta especie fúngica.

2.2.2.3 Inoculación del sustrato

Una vez que los sustratos esterilizados alcanzaron la temperatura ambiente, se procedió a la inoculación en condiciones de asepsia dentro de la cámara de seguridad de tipo II, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación por microorganismos ambientales. Se añadió el inóculo en grano de *Trametes versicolor* en una proporción fija del 5% del peso total de sustrato por unidad, equivalente a 15 g de inóculo por funda; la distribución del inóculo se realizó de forma manual y homogénea, mezclando el grano colonizado con el sustrato mediante la ayuda de una varilla de agitación estéril; concluida la inoculación de todas las unidades experimentales y de los controles, las fundas de polipropileno fueron selladas herméticamente con su tapa y se trasladaron al área de incubación.

2.2.2.4 Incubación y colonización

Las bolsas inoculadas fueron incubadas en una cámara de incubación a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con ventilación controlada, condiciones reportadas como óptimas para el desarrollo micelial de *T. versicolor* sobre sustratos lignocelulósicos según **Fabros et al. (2023)**. Durante este período de incubación, se realizó un seguimiento periódico del avance de la colonización micelial mediante inspección visual, estimando el porcentaje de sustrato colonizado durante un lapso de 15 días. Adicionalmente, se registró la presencia o ausencia de contaminación por microorganismos competidores, identificados por la aparición de masas miceliales con coloraciones atípicas, principalmente verdes o negras.

2.2.2.5 Fructificación

Una vez confirmada la colonización micelial del sustrato tras 15 días de incubación, se procedió a la inducción de la fructificación mediante la modificación controlada de las condiciones ambientales. Para ello, las bolsas inoculadas fueron colocadas en gavetas plásticas con tapa, previamente recubiertas con material opaco de polietileno negro, con la finalidad de reducir la exposición lumínica durante la fase inicial de diferenciación. Este procedimiento se fundamenta en que las condiciones de penumbra favorecen la transición del crecimiento vegetativo hacia la formación de estructuras reproductivas en diversos hongos basidiomicetos (Baars et al., 2020).

De manera simultánea, la temperatura de incubación fue ajustada a un rango de entre 18 y 22 °C y la humedad relativa se mantuvo por encima del 90% mediante nebulización periódica y la incorporación de agua en la base de las gavetas. Para evitar el contacto directo de las bolsas con el agua y garantizar una adecuada circulación de aire, se utilizó una malla metálica como soporte.

El empleo de gavetas recubiertas con material opaco constituyó una alternativa práctica para el control de las condiciones de iluminación en laboratorio, permitiendo recrear parcialmente las condiciones ambientales presentes en los hábitats naturales donde se desarrolla *Trametes versicolor*. Estas condiciones fueron mantenidas durante un período de tres semanas con el propósito de favorecer la aparición de primordios y evidenciar la capacidad de cada formulación de sustrato para sostener el desarrollo fisiológico del hongo.

Considerando que la producción de cuerpos fructíferos no constituyó el objetivo principal de esta investigación, sino un indicador complementario de viabilidad biológica del sustrato, el seguimiento de esta etapa permitió identificar aquellas formulaciones capaces de proporcionar las condiciones nutricionales y estructurales necesarias para completar las fases iniciales del proceso de fructificación sobre residuos agrícolas de maíz y caña de azúcar.

2.2.3 Análisis de la colonización fúngica

2.2.3.1 Evaluación de la producción y análisis fisicoquímicos

Una vez concluido el período de fructificación, se registra el peso fresco total de los cuerpos fructíferos obtenidos en cada unidad experimental mediante una balanza analítica. De forma complementaria, se contabilizó el número de estructuras desarrolladas y se describieron sus características morfológicas generales, incluyendo color, forma y tamaño, como indicadores cualitativos de la respuesta del hongo a las diferentes formulaciones de sustrato evaluadas

A partir del peso fresco de los cuerpos fructíferos y del peso seco inicial del sustrato, se calculó la eficiencia biológica (EB), empleando la ecuación descrita a continuación:

$$EB = \frac{\text{peso fresco de los cuerpos fructíferos}}{\text{peso seco del sustrato}} \cdot 100 \text{ (Ecuación 2)}$$

2.2.3.2 Análisis de resultados

Los datos obtenidos para las variables de respuesta, incluyendo porcentaje de colonización micelial, tiempo de colonización total, tiempo de aparición de primordios, peso fresco de los cuerpos fructíferos y eficiencia biológica, fueron sometidos a un análisis de varianza de dos vías (ANOVA bifactorial). Para ello, se consideraron como factores el tipo de residuo agrícola (maíz y caña de azúcar) y la proporción de mezcla con el material estructurante (25:75, 50:50 y 75:25).

El análisis se realizó con un nivel de significancia del 5% ($p \leq 0,05$), lo que permitió evaluar tanto los efectos principales de cada factor como la posible interacción entre ellos sobre las variables de respuesta estudiadas (Reverter, 2020).

Las diferencias estadísticas entre tratamientos fueron analizadas mediante el software estadístico Minitab® en su versión de prueba gratuita.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas

3.1.1.1 Humedad, pH y descripción física

Los resultados obtenidos en los análisis de humedad y pH, tanto en estado fresco como seco, de los residuos agrícolas evaluados y del material estructurante, así como su descripción física, se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4.

Caracterización fisicoquímica y descripción estructural de los residuos agrícolas y del material estructurante

Parámetro	Residuos de maíz (<i>Zea mays</i>)	Bagazo de caña (<i>Saccharum officinarum</i>)	Estructurante (<i>Aserrín</i>)
Humedad inicial (fresco)	85,5 ± 0,29	57,52 ± 0,19	17,25 ± 0,46
Humedad inicial (seco)	11,59 ± 0,22	7,46 ± 0,5	4,05 ± 0,71
pH (fresco)	5,59 ± 0,03	5,15 ± 0,05	7,95 ± 0,12
pH (seco)	5,69 ± 0,12	4,78 ± 0,05	6,01 ± 0,1
Color	Verde claro y verde oscuro	Beige claro y algunas fibras amarillentas	Marrón
Textura	Suave y flexible	Rugosa, ligera y un poco áspera al tacto	Granulosa, ligera y un poco áspera
Estructura fibrosa	Moderadamente fibrosa	Altamente fibrosa de forma longitudinal	Fibra fina y compacta
Porosidad	Porosidad media	Alta porosidad	Media - alta
Imagen referencial			

Nota. Elaboración propia a partir de los análisis realizados

Los resultados de la deshidratación del maíz, bagazo de caña de azúcar y aserrín, empleados como pretratamiento de los sustratos, mostraron reducciones de humedad del 86,4%, 87,0% y 76,5%, respectivamente. Estos resultados confirman la efectividad del proceso de deshidratación para reducir el contenido hídrico inicial de la biomasa lignocelulósica y estandarizar las condiciones previas a la rehidratación controlada. El rango de humedad final obtenido (4,05–11,59%) se encuentra dentro de los valores reportados para materiales lignocelulósicos sometidos a secado previo antes de su utilización en mezclas destinadas al cultivo de hongos basidiomicetos.

Desde el punto de vista microbiológico, la reducción del contenido de humedad constituye una etapa fundamental, ya que contenidos superiores al 20% pueden comprometer la estabilidad del material almacenado en condiciones aeróbicas, favoreciendo pérdidas de materia seca asociadas a procesos de degradación microbiana. En consecuencia, reducir la humedad por debajo de este límite contribuye a mantener la estabilidad microbiológica de los materiales durante las etapas de almacenamiento y manipulación previas a la inoculación (Smith et al., 2020).

Los valores de pH obtenidos mostraron diferencias entre los materiales evaluados. El bagazo de caña de azúcar presentó los valores más bajos, con $5,15 \pm 0,05$ en estado fresco y $4,78 \pm 0,05$ después del secado. Este comportamiento podría atribuirse a la concentración de ácidos orgánicos, principalmente ácido acético y ácido láctico, generados por procesos de fermentación superficial o concentrados tras la eliminación del agua libre durante el secado. Un comportamiento similar fue reportado por Ramezan et al. (2021), quienes observaron una disminución del pH de $6,0 \pm 0,2$ a $4,1 \pm 0,1$ después del pretratamiento de residuos de caña de azúcar.

Por su parte, el rastrojo de maíz mostró un comportamiento más estable, registrando valores de pH de $5,59 \pm 0,03$ en estado fresco y $5,69 \pm 0,12$ después del secado, sin variaciones relevantes entre ambas condiciones. Esta estabilidad sugiere una condición química potencialmente favorable para la colonización micelial. Finalmente, el aserrín presentó el valor de pH más elevado en estado fresco ($7,95 \pm 0,12$), disminuyendo a $6,01 \pm 0,10$ después del pretratamiento térmico. Este comportamiento refuerza su función como material regulador dentro de las mezclas experimentales, contribuyendo a compensar parcialmente la acidez aportada por los residuos agrícolas. Todos los valores obtenidos se encontraron dentro del rango reportado para el crecimiento de *Trametes versicolor* (pH 4,5–6,5), por lo que no fue necesario realizar ajustes adicionales antes de la formulación de los tratamientos.

En cuanto a las propiedades físicas, los tres materiales presentaron características diferenciadas que pueden influir en su desempeño como componentes del sustrato. El bagazo de caña de azúcar presentó una estructura altamente fibrosa y de disposición longitudinal, característica que favorece una elevada porosidad y facilita el intercambio gaseoso necesario para el crecimiento aeróbico de *T. versicolor*. Además, la marcada reducción de humedad observada durante el secado sugiere una importante

capacidad de liberación de agua, aspecto que puede influir en la regulación hídrica del sustrato durante la incubación(Desisa et al., 2024).

Por otro lado, el rastrojo de maíz presentó una estructura moderadamente fibrosa y una porosidad media, condiciones que podrían facilitar la penetración y expansión del micelio en el interior del sustrato. Sin embargo, su tendencia a perder humedad durante el proceso de secado indica la necesidad de un control adecuado durante la rehidratación para garantizar las condiciones requeridas para el crecimiento del hongo (Lorenzana-Moreno et al., 2023).

Finalmente, el aserrín presentó una estructura de fibra fina y compacta, acompañada de una porosidad media a alta. Estas características le permiten actuar como material estructurante dentro de las mezclas, favoreciendo la homogeneidad física del sustrato, mejorando la retención de humedad después de la rehidratación y reduciendo el riesgo de compactación excesiva durante la incubación. Asimismo, su bajo contenido de humedad inicial lo convierte en el material con mayor estabilidad hídrica de los evaluados, contribuyendo al equilibrio físico de las formulaciones (Schritt et al., 2021).

En conjunto, las características fisicoquímicas observadas respaldan la utilización de estos materiales dentro del diseño experimental factorial 2×3 planteado en la investigación. El bagazo de caña de azúcar y el rastrojo de maíz aportan la fracción lignocelulósica necesaria para el desarrollo de *Trametes versicolor*, mientras que el aserrín contribuye a mejorar la estructura física de las mezclas, favoreciendo la aireación, la retención de humedad y la estabilidad del sustrato durante la incubación.

3.1.1.2 Composición proximal de los sustratos

En la **Tabla 5** se muestran los resultados de la composición proximal de los sustratos utilizados, ensayo ejecutado en los laboratorios de la UODIDE de la Universidad Técnica de Ambato.

Tabla 5.

Composición proximal de los materiales lignocelulósicos evaluados (base seca)

Parámetro	% Grasa	% Cenizas	% N	% Proteína	% CHO*
Caña de azúcar	3,25	1,92	0,44	2,76	84,17
Maíz	1,91	6,74	1,09	6,81	71,86
Aserrín	0,41	1,49	0,31	1,94	91,81

*Nota. *carbohidratos (CHO) obtenido por diferencia.*

Los resultados obtenidos muestran diferencias importantes entre los tres materiales evaluados, lo que permite comprender mejor el papel que cada uno podría desempeñar dentro de las mezclas formuladas para el cultivo de *Trametes versicolor*. Aunque todos corresponden a materiales de naturaleza

lignocelulósica, su composición nutricional presentó características particulares que podrían influir en el comportamiento del hongo durante la colonización del sustrato. En relación con el contenido de grasa, los tres materiales presentaron porcentajes relativamente bajos, condición esperada para este tipo de residuos. El valor más alto se registró en la caña de azúcar (3,254%), seguido por el maíz (1,906%) y el aserrín (0,407%). Este comportamiento puede estar asociado a la presencia de ceras y otros compuestos lipídicos presentes en los tejidos externos de *Saccharum officinarum* (Del Río et al., 2015). Aunque los hongos ligninolíticos utilizan principalmente compuestos carbonados como fuente energética, pequeñas cantidades de lípidos pueden contribuir al mantenimiento celular y a determinados procesos metabólicos durante el crecimiento del micelio (Hao & Barker, 2022).

Respecto al contenido de cenizas, el maíz presentó el valor más elevado (6,74%), superando ampliamente a la caña de azúcar (1,92%) y al aserrín (1,49%). Este resultado sugiere una mayor disponibilidad de minerales en el residuo de maíz, aspecto que podría representar una ventaja para el crecimiento fúngico, considerando que diversos elementos minerales participan en procesos enzimáticos y metabólicos esenciales para la degradación de la biomasa lignocelulósica (Li et al., 2020). Por el contrario, el aserrín mostró el menor contenido mineral, situación que coincide con su origen leñoso y con la función estructural que suele desempeñar dentro de este tipo de formulaciones.

Uno de los resultados más relevantes fue el contenido de nitrógeno y proteína. El maíz alcanzó el mayor porcentaje de nitrógeno (1,09%), seguido por la caña de azúcar (0,441%) y el aserrín (0,31%). Esta diferencia también se reflejó en el contenido de proteína cruda, donde el maíz presentó un valor de 6,812%, considerablemente superior al de los otros materiales. Este comportamiento resulta especialmente importante debido a que el nitrógeno suele considerarse uno de los nutrientes más limitantes en los sustratos lignocelulósicos destinados al cultivo de hongos. Una mayor disponibilidad de este elemento puede favorecer la síntesis de proteínas, enzimas y otras moléculas necesarias para el establecimiento y expansión del micelio sobre el sustrato (Waing & Dulay, 2025 & Suwannarach et al., 2022).

Por otra parte, los carbohidratos representaron la fracción predominante en los tres materiales analizados. El aserrín presentó el mayor contenido (91,805%), seguido por la caña de azúcar (84,167%) y el maíz (71,862%). Estos resultados son consistentes con la naturaleza lignocelulósica de los materiales, ya que una gran parte de esta fracción corresponde a celulosa y hemicelulosa, compuestos que pueden ser degradados por las enzimas producidas por *T. versicolor*. En consecuencia, tanto el aserrín como la caña de azúcar representan importantes reservorios de carbono para el desarrollo del hongo, aunque la disponibilidad real de estos compuestos dependerá de la capacidad del micelio para degradar las estructuras vegetales presentes en cada sustrato (Hsin et al., 2025).

En este sentido, el bagazo de caña, con 84,167% de CHO, ofrece una fuente de carbono abundante y accesible para la actividad enzimática de *T. versicolor*. El aserrín, con el mayor porcentaje de CHO

(91,805%), actúa fundamentalmente como reserva de carbono estructural de baja disponibilidad inmediata, lo que explica su función como material de soporte más que como sustrato nutritivo activo.

En conjunto, la composición proximal revela una complementariedad nutricional entre los tres materiales que justifica su uso combinado en el diseño experimental; el bagazo de caña aporta la mayor carga de carbohidratos estructurales accesibles como fuente de carbono mientras que el rastrojo de maíz compensa la deficiencia nitrogenada del bagazo con su mayor contenido proteico y mineral y, el aserrín actúa como diluyente estructural de alta densidad carbonada que regula la relación C/N global.

3.1.1.3 Composición carbono-nitrógeno

La relación carbono-nitrógeno (C/N) constituye uno de los parámetros fisicoquímicos más determinantes para evaluar la aptitud de un sustrato lignocelulósico en el cultivo de hongos basidiomicetos, dado que refleja el balance entre la disponibilidad de carbono estructural y el nitrógeno orgánico, indispensable para la síntesis de proteínas enzimáticas y estructurales durante el crecimiento vegetativo (Suwannarach et al., 2022).

A partir de los datos de porcentaje de nitrógeno total obtenidos mediante el método de combustión Dumas y del porcentaje de carbohidratos totales calculado por diferencia en el análisis proximal, se estimó el porcentaje de carbono orgánico de cada material empleando el factor de conversión estándar para biomasa lignocelulósica (Ecuación 3), y posteriormente se calculó la relación C/N (Ecuación 4):

$$\% C \text{ orgánico} = \% \text{ Carbohidratos totales} * 0.40 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$C/N = \frac{\% C \text{ orgánico}}{\% N \text{ total}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El factor 0,40 considera que aproximadamente el 40% de la masa de carbohidratos en biomasa vegetal corresponde a carbono elemental, valor ampliamente aceptado para matrices lignocelulósicas compuestas predominantemente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Segers et al., 2024). Los resultados se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6.

Estimación de la relación carbono-nitrógeno (C/N) de los materiales lignocelulósicos evaluados.

Material	% CHO*	% C	% N	C/N
Caña de azúcar	84,17	33,67	0,44	76,3 : 1
Maíz	71,86	28,74	1,09	26,4 : 1
Aserrín	91,81	36,72	0,31	118,5 : 1

*Nota. *carbohidratos (CHO) obtenido por diferencia.*

Los tres materiales presentaron relaciones C/N marcadamente diferentes, con implicaciones directas sobre su potencial como sustratos individuales y sobre el fundamento de su combinación en mezclas proporcionales. La cáscara de maíz registró la relación C/N más baja (26,4:1), ubicándose dentro del rango óptimo reportado para el desarrollo de *T. versicolor* (20–100:1) (Thuy et al., 2021). Este resultado indica una disponibilidad de nitrógeno suficiente para sostener la síntesis del aparato enzimático ligninolítico desde las primeras etapas de colonización; este resultado es consistente con su mayor contenido de proteína cruda (6,81%) y nitrógeno total (1,09%) observados en el análisis proximal, y sugiere que los sustratos con mayor proporción de maíz podrían favorecer una actividad ligninolítica más temprana y sostenida por parte del micelio.

La cáscara de caña de azúcar presentó una relación C/N de 76,3:1, valor que, si bien se encuentra dentro del límite superior del rango aceptado para *T. versicolor*, refleja una disponibilidad de nitrógeno considerablemente más restringida respecto al maíz. No obstante, esta característica no es necesariamente limitante, dado que *T. versicolor* como hongo de pudrición blanca está adaptado a sustratos naturalmente pobres en nitrógeno, como la madera en descomposición, donde la relación C/N puede superar 100:1 (Fabros et al., 2023). Además, su elevado contenido de carbohidratos (84,17%) proporciona una fuente importante de carbono para el metabolismo del hongo.

El aserrín exhibió la relación C/N más elevada de los tres materiales (118,5:1), superando el límite superior del rango óptimo, lo que confirma su función como material estructurante más que como fuente nutricional para el hongo. Una relación C/N excesivamente alta puede ralentizar la actividad metabólica fúngica al limitar la síntesis de enzimas ligninolíticas nitrógeno-dependientes como la lacasa y la MnP (Vandelook et al., 2024). Sin embargo, su aporte estructural continúa siendo relevante, ya que mejora la porosidad, favorece la aireación y contribuye a mantener una adecuada retención de humedad.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la estrategia de formular mezclas entre residuos agrícolas y aserrín. Mientras el rastrojo de maíz aporta nitrógeno y proteína, el bagazo de caña proporciona una importante reserva de carbono estructural y el aserrín contribuye a mejorar las propiedades físicas del sustrato. Esta complementariedad permite obtener formulaciones con relaciones C/N más equilibradas, potencialmente favorables para el crecimiento y desarrollo de *Trametes versicolor*.

3.1.2 Evaluación del crecimiento y colonización micelial de *Trametes versicolor*

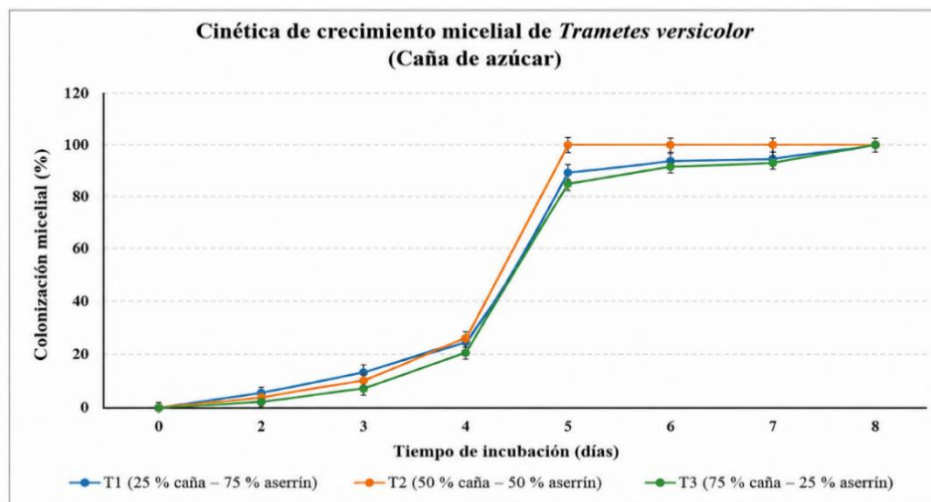
3.1.2.1 Evaluación en placas

El crecimiento y la colonización micelial de *Trametes versicolor* en placa, se evaluó mediante el porcentaje de colonización del micelio en seis formulaciones de sustrato elaboradas a partir de residuos agrícolas (caña de azúcar y maíz) combinados con aserrín, en un medio con agar y glucosa. Los

tratamientos evaluados fueron: T1 (25% caña – 75% aserrín), T2 (50% caña – 50% aserrín), T3 (75% caña – 25% aserrín), T4 (25% maíz – 75% aserrín), T5 (50% maíz – 50% aserrín) y T6 (75% maíz – 25% aserrín), cada uno con tres repeticiones. Se presenta en la figura 1 un diagrama del avance de la colonización con el paso del tiempo hasta alcanzar el 100%.

Figura 1.

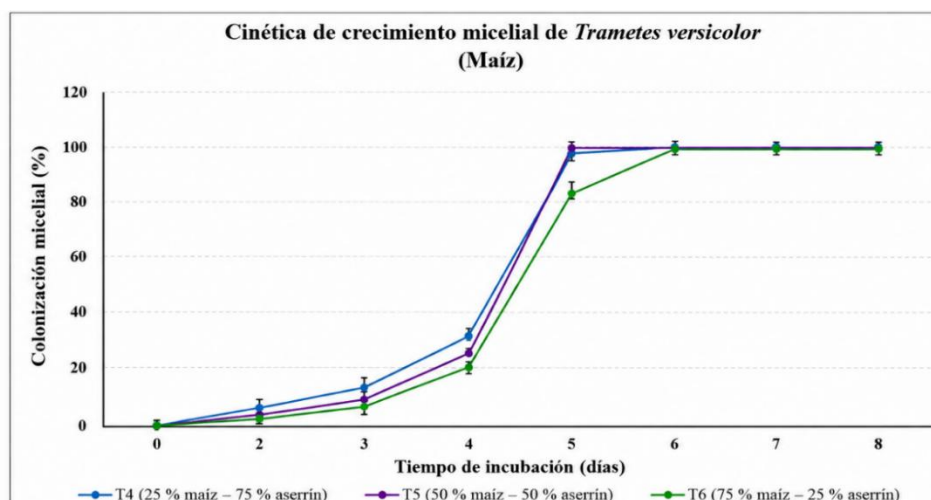
Crecimiento micelial de Trametes versicolor en sustratos formulados con bagazo de caña y aserrín (T1, T2 y T3)



Nota. Elaboración propia. Datos correspondientes a la media y desviación estándar de las 3 réplicas de cada tratamiento: T1 (25% caña – 75% aserrín), T2 (50% caña – 50% aserrín) y T3 (75% caña – 25% aserrín)

Figura 2.

Crecimiento micelial de Trametes versicolor en sustratos formulados con rastrojo de maíz y aserrín (T4, T5 y T6).



Nota. Elaboración propia. Datos correspondientes a la media y desviación estándar de las 3 réplicas de cada tratamiento: T1 (25% maíz – 75% aserrín), T2 (50% maíz – 50% aserrín) y T3 (75% maíz – 25% aserrín)

Las **figuras 1 y 2**, muestran la evolución del porcentaje de colonización micelial de *Trametes versicolor* en las diferentes formulaciones de sustrato elaboradas con bagazo de caña de azúcar, rastrojo de maíz y aserrín. En todos los tratamientos se observó una fase inicial de crecimiento lento durante los primeros tres días de incubación; por ejemplo, en el día 2 la colonización osciló aproximadamente entre 1,8% y 8,9%, evidenciando el inicio de la expansión del micelio en los sustratos, este fenómeno ha sido documentado ampliamente para hongos de la podredumbre blanca, con períodos de latencia de 24–72 horas reportados para sustratos lignocelulósicos de distinta composición observados por **Desisa et al. (2024)**. En los tratamientos formulados con bagazo de caña de azúcar (**Figura 1**), T1 y T2 alcanzaron el 100% de colonización al quinto día de incubación, mientras que T3 presentó un crecimiento ligeramente más lento, alcanzando valores cercanos al 95% entre los días 6 y 7 y completando la colonización al día 8. De forma similar, en los tratamientos formulados con rastrojo de maíz (**Figura 2**), T4 y T5 alcanzaron el 100% de colonización al quinto día, mientras que T6 presentó una respuesta ligeramente más lenta durante esta etapa, aunque logró la colonización completa en los días posteriores.

Los resultados obtenidos demuestran que *Trametes versicolor* posee una elevada capacidad para colonizar diferentes formulaciones de sustratos lignocelulósicos elaborados a partir de residuos agrícolas, alcanzando en todos los casos una colonización completa del sustrato. Este comportamiento confirma la versatilidad metabólica del hongo, característica de los hongos de pudrición blanca, los cuales poseen sistemas enzimáticos capaces de degradar eficientemente compuestos estructurales como lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en materiales vegetales (**Diosma et al., 2025**)

Los tratamientos T1 (25% caña – 75% aserrín), T4 (25% maíz – 75% aserrín) y T5 (50% maíz – 50% aserrín) mostraron una colonización más rápida durante las primeras etapas del cultivo, esto sugiere que la presencia de aserrín en proporciones moderadas o altas favorece el desarrollo micelial, probablemente debido a que este material proporciona una estructura más porosa y aireada, facilitando la difusión de oxígeno y la penetración del micelio en el sustrato, mejorando la estabilidad física del sustrato (**Liadi et al., 2026**).

Por otro lado, los tratamientos con mayor proporción de residuo agrícola, particularmente T3 (75% caña – 25% aserrín) y T6 (75% maíz – 25% aserrín), mostraron una colonización ligeramente más lenta en el día 7, este comportamiento, en los dos tratamientos con mayor proporción del residuo agrícola principal, sugiere que la concentración elevada de residuo genera limitaciones fisicoquímicas al crecimiento micelial, lo que podría estar relacionado con una mayor compactación del sustrato o con diferencias en la composición química, como mayores concentraciones de compuestos estructurales o posibles metabolitos inhibidores presentes en los residuos.

Una posible explicación a este fenómeno reside en la mayor concentración de lignina y compuestos fenólicos inhibitorios presentes cuando la proporción de residuo agrícola es alta, ya que, a mayor concentración de estos compuestos, la actividad del sistema enzimático de *T. versicolor* puede verse temporalmente saturada o inhibida, retardando la colonización. **Kumla et al. (2020)**, en su estudio reportaron que proporciones elevadas de lignina sin degradar en sustratos lignocelulósicos crean barreras estéricas que reducen la accesibilidad de la celulosa y la hemicelulosa, sustrato preferencial de las enzimas hidrolíticas fúngicas.

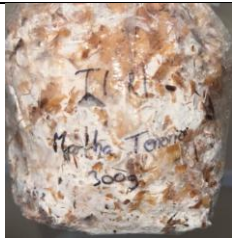
La mayor variabilidad entre repeticiones observada en T3 (SD = $\pm 6,64\%$ en día 7) y T6 (SD = $\pm 12,93\%$ en día 8) refuerza la hipótesis de que la elevada proporción de residuo agrícola genera condiciones de sustrato más heterogéneas, con zonas de mayor y menor disponibilidad de nutrientes y diferente resistencia a la colonización. A pesar de estas diferencias iniciales en la velocidad de colonización, todos los tratamientos alcanzaron finalmente el 100% de colonización, lo que evidencia que tanto los residuos de caña de azúcar como de maíz pueden ser utilizados como sustratos alternativos viables para *Trametes versicolor*.

3.1.2.2 Evaluación en fundas

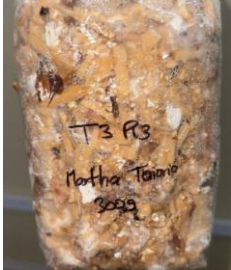
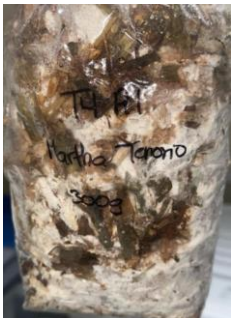
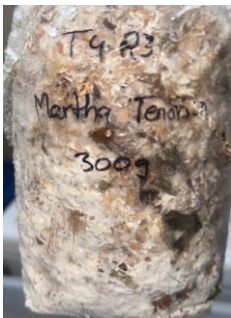
Durante el periodo de incubación de 15 días en cámara de germinación, el micelio de *Trametes versicolor* inició la colonización del sustrato pocos días después de la inoculación, evidenciándose la formación de una red micelial blanca sobre la superficie de las mezclas lignocelulósicas. En la **tabla 7** se presenta la estimación del porcentaje de colonización transcurrido los 15 días, medido en base a la superficie frontal de la funda y la superficie colonizada.

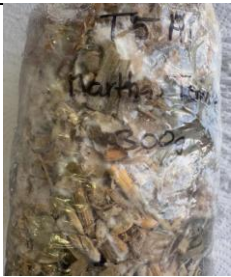
Tabla 7.

Estimación del porcentaje de colonización en fundas

Unidad experimental	% de colonización estimado	Contaminación	Imagen referencial
T1 R1	70	Ausente	

Unidad experimental	% de colonización estimado	Contaminación	Imagen referencial
T1 R2	60	Ausente	
T1 R3	60	Ausente	
T2 R1	70	Ausente	
T2 R2	60	Ausente	
T2 R3	60	Ausente	
T3 R1	40	Ausente	

Unidad experimental	% de colonización estimado	Contaminación	Imagen referencial
T3 R2	35	Ausente	
T3 R3	40	Ausente	
T4 R1	75	Ausente	
T4 R2	60	Ausente	
T4 R3	80	Ausente	

Unidad experimental	% de colonización estimado	Contaminación	Imagen referencial
T5 R1	40	Ausente	
T5 R2	45	Ausente	
T5 R3	40	Ausente	
T6 R1	30	Ausente	
T6 R2	30	Ausente	
T6 R3	35	Ausente	

Nota. Elaboración propia.

Al término del período de incubación, ningún tratamiento presentó colonización completa del sustrato en funda, aunque, se evidenció la formación de una red micelial de coloración blanca sobre la superficie de los sustratos. Al término del período establecido, se registraron diferencias visibles en el porcentaje de colonización entre los seis tratamientos evaluados, sin que se detectara contaminación en ninguna de las 18 unidades experimentales.

Tabla 8. Evaluación del micelio de *Trametes versicolor* en funda

Tratamiento	% Colonización día 15	Descripción morfológica micelio
T1	63.3	Masa algodonosa blanca, mayor densidad, hifas desarrolladas
T2	63.3	Masa algodonosa blanca, mayor densidad, hifas desarrolladas
T3	38.3	Masa algodonosa blanca, mayor densidad, hifas desarrolladas
T4	71.7	Masa algodonosa blanca densa, mayor avance colonizador, micelio robusto
T5	41.7	Menor identificación de hifas, colonización moderada
T6	31.7	Menor identificación de hifas, colonización incipiente, baja densidad

Nota. Elaboración propia. Colonización registrada en base a la media de las tres réplicas realizadas.

Los resultados expuestos en la **Tabla 8**, demuestran que *Trametes versicolor* posee capacidad de colonización sobre los dos residuos agrícolas evaluados en combinación con aserrín como material estructural; sin embargo, la respuesta del hongo varió considerablemente según la proporción de cada componente en la mezcla. El tratamiento T4 (25% maíz – 75% aserrín) fue el de mayor colonización del experimento (71,7%), y de modo análogo, T1 (25% caña – 75% aserrín) y T2 (50% caña – 50% aserrín) mostraron valores superiores (63,3%) frente a T3 (75% caña – 25% aserrín, 38,3%). Estos resultados indican que proporciones altas de aserrín en la mezcla no restringieron el crecimiento micelial, sino que podrían favorecerla; el aserrín es un sustrato lignocelulósico ampliamente utilizado en el cultivo de hongos de pudrición blanca por su elevada porosidad, que facilita el intercambio gaseoso y la distribución uniforme de la humedad; propiedades que son determinantes para la velocidad de colonización del micelio (Thuy et al., 2021). Desisa et al. (2024), al cultivar cepas silvestres de *T. versicolor* sobre sustratos basados en subproductos de caña de azúcar, destacaron que las características físicas del sustrato son tan relevantes como la composición química para explicar la dinámica de invasión micelial.

Estos resultados también podrían estar relacionados con las diferencias observadas en la relación carbono/nitrógeno de los materiales evaluados. Como se discutió previamente, el rastrojo de maíz presentó una relación C/N más cercana al rango considerado favorable para el crecimiento de *T. versicolor*, mientras que el aserrín aportó principalmente carbono estructural y mejores propiedades físicas. La combinación equilibrada de ambos factores podría haber favorecido el establecimiento del micelio en tratamientos como T4.

Sin embargo, la tendencia inversa entre la concentración del residuo agrícola y el porcentaje de colonización registrada en este estudio (mayor residuo agrícola, menor colonización) puede deberse a que en concentraciones altas de bagazo de caña (T3) o de rastrojo de maíz (T6), podría estar asociada a cambios en la estructura física del sustrato, incluyendo una posible reducción de la porosidad y del intercambio gaseoso. En concordancia con esto, **Mou et al. (2023)** observaron que la densidad física del sustrato condiciona la transcripción de genes relacionados con la síntesis proteica y la actividad enzimática en hongos de pudrición blanca, afectando directamente la tasa de colonización.

Desisa et al. (2024) reportaron que sustratos con 80% de bagazo de caña, complementados con estiércol de caballo y gallinaza, produjeron la mayor eficiencia biológica (31,5%) y el mayor rendimiento de cuerpos fructíferos (158,33 g por bolsa de 500 g), destacando al bagazo de caña como base óptima del sustrato cuando se combina con fuentes nitrogenadas adecuadas. La diferencia con el presente estudio radica en que, en lugar de suplementos nitrogenados, el material estructural empleado fue aserrín, cuya composición lignocelulósica difiere nutricionalmente de los estiércoles animales, siendo este un factor que influye directamente en ambos parámetros.

Por otra parte, el rastrojo de maíz ha sido señalado como un sustrato que estimula la actividad celulásica de los hongos de pudrición blanca de forma eficiente; **Mou et al. (2023)**, al evaluar la colonización de *Lentinula edodes* (otro basidiomiceto de pudrición blanca) en tallo de maíz y madera de roble, registraron un crecimiento hifal más rápido y la formación de redes miceliales más densas sobre el tallo de maíz, atribuyendo este comportamiento al mayor contenido de azúcares solubles y a una relación celulosa:lignina más favorable para la degradación enzimática. Esta mayor accesibilidad de los carbohidratos del rastrojo de maíz podría haber contribuido al mejor desempeño observado en T4.

Adicionalmente, la mayor variabilidad interna observada en el grupo de maíz (40,0 puntos porcentuales entre T4 y T6) frente al de caña (25,0 puntos entre T1, T2 y T3) sugiere que la concentración del rastrojo de maíz en el sustrato ejerce un efecto más marcado sobre el desarrollo micelial. Según **Campi et al. (2021)**, *T. versicolor* desarrolla velocidades de crecimiento diferenciadas en función de la naturaleza del sustrato lignocelulósico, siendo los sustratos con alta proporción de lignina los que inducen una mayor secreción de enzimas oxidativas (lacasa, MnP, LiP), las cuales son necesarias para degradar la pared celular vegetal antes de que el micelio pueda avanzar. Diversos autores documentan que el

rastrojo de maíz suele presentar mayores proporciones de lignina que el bagazo de caña, lo que podría explicar la menor colonización en T6 (75% maíz), donde la alta concentración de lignina pudo ralentizar la penetración hifal.

La ausencia de contaminación en la totalidad de las unidades experimentales respalda la efectividad del protocolo de preparación y esterilización aplicado. La esterilización a 121 °C durante 15 minutos es ampliamente validada en estudios de cultivo de hongos lignocelulolíticos (Thuy et al., 2021), garantizando la eliminación de microorganismos competidores que podrían interferir con el establecimiento del inóculo de *T. versicolor*. Este resultado es relevante desde el punto de vista metodológico, pues garantiza que las diferencias en colonización observadas entre tratamientos son atribuibles exclusivamente a las variables experimentales y no a factores de contaminación externos.

En conjunto, los resultados obtenidos al día 15 de incubación evidencian que *Trametes versicolor* fue capaz de colonizar satisfactoriamente todas las formulaciones evaluadas, aunque con diferencias marcadas en el porcentaje de avance micelial. Los tratamientos con menor proporción de residuo agrícola y mayor contenido de aserrín presentaron los mayores niveles de colonización, mientras que las mezclas con alta proporción de residuo mostraron una colonización más lenta. Estos resultados sugieren que las características físicas y nutricionales del sustrato influyen de manera importante en el establecimiento del micelio y respaldan el potencial de los residuos de maíz y caña de azúcar como componentes de sustratos alternativos para el cultivo de *Trametes versicolor*.

3.1.2.3 Fructificación

Una vez finalizado el período de colonización en fundas, se procedió a la inducción de la fructificación de *Trametes versicolor* mediante la modificación de las condiciones ambientales establecidas en el protocolo experimental, manteniendo una humedad relativa entre 85 y 95%, temperaturas comprendidas entre 20 y 28 °C, ventilación controlada y aplicación periódica de estímulos hídricos mediante nebulización superficial. Durante las tres semanas de seguimiento posteriores a esta etapa (21 días), ninguna de las unidades experimentales desarrolló primordios ni cuerpos fructíferos, independientemente del tratamiento evaluado.

Las observaciones realizadas durante este período evidenciaron la permanencia y el desarrollo del micelio vegetativo sobre la superficie del sustrato, especialmente en aquellas unidades que habían alcanzado mayores porcentajes de colonización. Sin embargo, no se observaron estructuras compatibles con el inicio de la fase reproductiva. En consecuencia, no fue posible registrar variables asociadas a la producción de cuerpos fructíferos, tales como peso fresco, eficiencia biológica, rendimiento productivo

o tiempo de aparición de primordios, impidiendo el análisis estadístico correspondiente a estas variables.

La ausencia de fructificación no implica necesariamente una falta de adaptación del hongo a los sustratos evaluados, ya que durante la etapa previa se observó crecimiento micelial activo y ausencia total de contaminación en las unidades experimentales. Estos resultados demuestran que *Trametes versicolor* fue capaz de establecerse y desarrollarse sobre las formulaciones evaluadas, aunque no alcanzó la transición hacia la fase reproductiva dentro del tiempo de seguimiento considerado en este estudio.

Según **Fabros et al., (2023)**, la formación de cuerpos fructíferos en hongos de pudrición blanca depende no solamente de las condiciones ambientales de inducción, sino también del grado de madurez fisiológica alcanzado por el micelio durante la etapa vegetativa. La diferenciación de primordios requiere una red micelial completamente establecida, reservas metabólicas suficientes y una actividad enzimática capaz de sostener la movilización de nutrientes hacia las estructuras reproductivas. Cuando estas condiciones no se alcanzan, el micelio puede permanecer en fase vegetativa aun cuando los estímulos ambientales sean adecuados.

Durante el desarrollo experimental se produjo un retraso en la disponibilidad del inóculo debido a inconvenientes reportados por el proveedor, situación que redujo el tiempo inicialmente previsto para la etapa de colonización. Aunque varios tratamientos alcanzaron elevados porcentajes de colonización, el período efectivo de incubación podría no haber sido suficiente para garantizar la madurez fisiológica requerida para inducir la fructificación. En este sentido, diversos estudios han reportado que *T. versicolor* puede requerir entre 21 y 35 días de colonización previa antes de responder adecuadamente a los estímulos de fructificación, dependiendo de la composición del sustrato y de las condiciones ambientales de cultivo (**Ramezan et al., 2021**).

Adicionalmente, factores relacionados con la composición nutricional de los sustratos podrían haber influido en la velocidad de maduración del micelio. En particular, las diferencias observadas en la relación carbono/nitrógeno entre los residuos agrícolas evaluados podrían modificar la disponibilidad de nutrientes y la dinámica de degradación de la fracción lignocelulósica, condicionando indirectamente la acumulación de reservas metabólicas necesarias para la formación de primordios (**Kumla et al., 2020**).

En conjunto, los resultados obtenidos indican que las condiciones evaluadas permitieron el crecimiento vegetativo de *Trametes versicolor*, pero no fueron suficientes para inducir la formación de estructuras reproductivas dentro del período experimental considerado. Por ello, futuros estudios deberían contemplar tiempos más prolongados de colonización y seguimiento, con el fin de determinar si la ausencia de fructificación responde a una limitación temporal o a características específicas de las formulaciones de sustrato empleadas.

3.1.3 Análisis estadístico de la colonización fúngica

Debido a que al finalizar el período de fructificación (tres semanas) no se observó la formación de primordios ni cuerpos fructíferos en ninguna de las unidades experimentales, no fue posible evaluar variables productivas como eficiencia biológica, rendimiento de biomasa o tiempo de aparición de estructuras reproductivas. En consecuencia, la comparación estadística entre tratamientos se realizó únicamente sobre las variables asociadas al crecimiento y colonización de *Trametes versicolor*.

Para evaluar el efecto de las formulaciones de sustrato sobre el desarrollo del hongo, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial, considerando como factores el tipo de residuo agrícola (caña de azúcar y maíz) con dos niveles y la proporción de residuo agrícola en la mezcla (25%, 50% y 75%) con tres niveles, configurando un diseño factorial 2×3 con tres réplicas por tratamiento ($n = 18$).

Las variables de respuesta analizadas de forma independiente fueron:

1. Porcentaje de colonización micelial en placa al día 4.
2. Tasa de crecimiento micelial diario en placa.
3. Porcentaje de colonización estimado en funda al día 15.

Previo a la aplicación del ANOVA, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para cada variable evaluada. Debido a que los datos cumplieron con dichos supuestos, se consideró apropiado el uso de estadística paramétrica para el análisis de los resultados, conforme a los criterios descritos por **Montgomery (2022)**.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software Minitab®, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

3.1.3.1 Porcentaje de colonización en placa (día 4)

La **Tabla 9** presenta los resultados del análisis de varianza factorial realizado para el porcentaje de colonización registrado en placa al cuarto día de incubación. Este punto temporal fue seleccionado debido a que corresponde a la etapa de mayor diferenciación entre tratamientos antes de que ocurriera la colonización total de las placas. A partir del día 7, la mayoría de las unidades experimentales alcanzaron porcentajes cercanos al 100% de colonización, reduciendo considerablemente la variabilidad necesaria para realizar comparaciones estadísticas entre tratamientos.

Los resultados del ANOVA muestran que ni el tipo de sustrato, ni la concentración de residuo agrícola, ni la interacción entre ambos factores presentaron efectos estadísticamente significativos sobre el

porcentaje de colonización al día 4 ($p > 0,05$). Estos resultados indican que, durante las etapas iniciales del crecimiento micelial, *Trametes versicolor* presentó un comportamiento similar en todos los sustratos evaluados, independientemente de la fuente lignocelulósica utilizada o de su proporción dentro de la formulación.

Tabla 9.

Resultados del análisis de varianza factorial para el porcentaje de colonización micelial de Trametes versicolor en placa al día 4 de incubación.

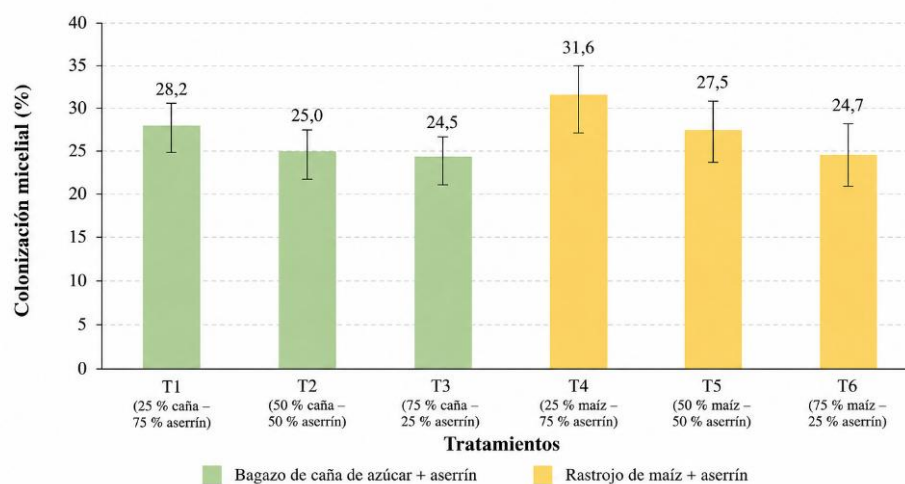
Fuente de variación	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	Sig.
Sustrato	1	18.422	18.422	0.50	0.494	ns
Concentración	2	88.516	44.258	1.20	0.336	ns
Sustrato × Concentración	2	8.360	4.180	0.11	0.894	ns
Residuos	12	443.449	36.954	—	—	—

Nota. Elaboración propia de acuerdo a los datos obtenidos en R. GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática. ns = no significativo ($p \geq 0.05$).

Los resultados sugieren que en la etapa inicial de colonización (primeros cuatro días), *Trametes versicolor* presenta una capacidad adaptativa similar en todos los sustratos evaluados, independientemente del residuo agrícola empleado o su concentración. Este comportamiento es consistente con la fase de adaptación micelial, donde la influencia del sustrato aún no se manifiesta de manera diferenciada (Ramezan et al., 2021).

Figura 3.

Porcentaje de colonización micelial de Trametes versicolor en placa al día 4 de incubación.



Nota. Las barras representan la media de las tres réplicas por tratamiento junto con su desviación estándar (líneas de error).

La gráfica de interacción presentada en la **Figura 3** respalda los resultados obtenidos mediante el ANOVA. Aunque se observa una tendencia hacia mayores porcentajes de colonización en los tratamientos con menor concentración de residuo agrícola (25%), especialmente en las formulaciones elaboradas con maíz, dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Asimismo, las líneas de interacción muestran una disminución progresiva de la colonización conforme aumenta la concentración del residuo agrícola, pero mantienen una trayectoria relativamente similar entre ambos sustratos, lo que evidencia la ausencia de una interacción importante entre los factores evaluados.

Por tanto, los resultados indican que las formulaciones evaluadas no ejercieron un efecto diferencial sobre la colonización micelial durante los primeros cuatro días de incubación, sugiriendo que *Trametes versicolor* fue capaz de adaptarse de manera similar a todas las combinaciones de sustrato evaluadas en esta fase inicial del cultivo.

3.1.3.2 Tasa de crecimiento micelial diario

La **Tabla 10** presenta los resultados del análisis de varianza factorial realizado para la tasa de crecimiento micelial diaria de *Trametes versicolor* en placa. Los resultados muestran que la concentración de residuo agrícola fue el único factor que ejerció un efecto estadísticamente significativo sobre esta variable ($p = 0,010$). Por el contrario, ni el tipo de sustrato empleado (maíz o caña de azúcar) ni la interacción entre ambos factores presentaron efectos significativos ($p > 0,05$). Para la tasa de crecimiento micelial diario calculada en placa, mediante la siguiente ecuación:

$$Tasa\ diaria\ de\ crecimiento = \frac{\left(\frac{Valor\ final - Valor\ inicial}{Valor\ inicial}\right)}{Número\ de\ días} * 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Tabla 10.

Análisis de varianza factorial 2×3 para la tasa de crecimiento micelial diario en placa.

Fuente de variación	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	Sig.
Sustrato	1	0.057	0.0569	0.01	0.913	ns
Concentración	2	62.465	31.2327	6.89	0.010	s
Sustrato × Concentración	2	1.153	0.5763	0.13	0.882	ns
Residuos	12	54.433	4.5361	—	—	—

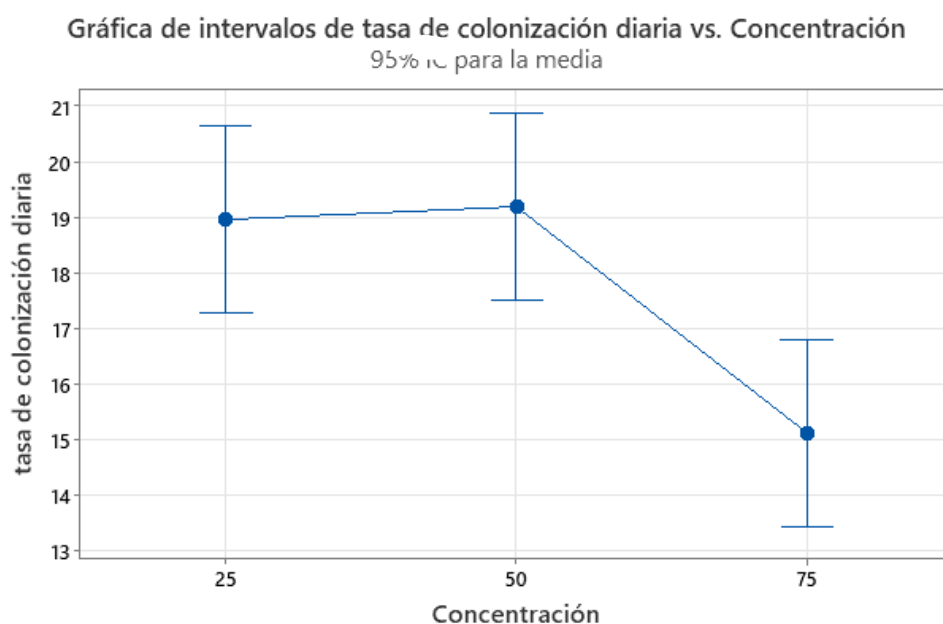
Nota. Elaboración propia de acuerdo a los datos obtenidos en Minitab. GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; ns = no significativo ($p \geq 0.05$) y s = significativo ($p \leq 0.05$).

Los resultados indican que la velocidad de crecimiento micelial estuvo influenciada principalmente por la proporción de residuo agrícola incorporada al medio de cultivo. Debido a que el factor concentración presentó diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$) con el propósito de identificar cuáles niveles diferían entre sí.

La prueba de Tukey mostró que las concentraciones de 25% y 50% conformaron un mismo grupo estadístico homogéneo (A), con medias de crecimiento de 18,95 y 19,18 unidades por día, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas. En contraste, la concentración del 75% se ubicó en un grupo independiente (B), presentando una media significativamente inferior (15,12 unidades por día). Estos resultados evidencian que el incremento de la proporción de residuo agrícola en el medio de cultivo redujo la velocidad de colonización micelial de *Trametes versicolor*.

La **Figura 4** muestra las medias e intervalos de confianza al 95% correspondientes a cada nivel de concentración. Se observa que las concentraciones de 25% y 50% presentan valores similares, mientras que la concentración de 75% registra una disminución evidente en la tasa de crecimiento micelial. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos mediante el análisis de Tukey y confirma que las mayores proporciones de residuo agrícola generan condiciones menos favorables para el avance del micelio durante las etapas iniciales de crecimiento.

Figura 4. Medias e intervalos de confianza (95%) de la tasa de crecimiento micelial diaria de *Trametes versicolor* según la concentración de residuo agrícola.



Nota. Gráfica obtenida de Minitab. Diferenciado por sustrato concentración (25%, 50%, 75%) y la media de la tasa de colonización diaria.

Una posible explicación para este comportamiento es que el incremento de la proporción de biomasa lignocelulósica modifica las características físicas y químicas del medio de cultivo, dificultando el acceso inicial del micelio a los nutrientes disponibles. Diversos estudios han reportado que sustratos con altas proporciones de material lignocelulósico pueden presentar una menor disponibilidad inmediata de compuestos fácilmente metabolizables, lo que ralentiza la expansión micelial durante las primeras fases de colonización. En este sentido, **Desisa et al. (2024)**, observaron que formulaciones con elevadas proporciones de materiales lignocelulósicos sin acondicionamiento adecuado redujeron la velocidad de crecimiento de especies del género *Trametes*, atribuyendo este efecto a la complejidad estructural de los polímeros presentes en el sustrato.

3.1.3.3 Porcentaje de colonización estimado en bolsa

La **Tabla 11** presenta los resultados del análisis de varianza factorial realizado para el porcentaje de colonización micelial estimado en funda. A diferencia de las variables evaluadas en placa, se observaron efectos estadísticamente significativos tanto para el tipo de sustrato ($F = 6,00$; $p = 0,031$) como para la concentración de residuo agrícola ($F = 47,63$; $p < 0,001$). Adicionalmente, la interacción entre ambos factores también resultó significativa ($F = 10,12$; $p = 0,003$), indicando que la respuesta del micelio frente a los cambios de concentración dependió del tipo de residuo agrícola utilizado.

Tabla 11.

*Análisis de varianza factorial 2×3 para el porcentaje de colonización micelial de *Trametes versicolor* en bolsa.*

Fuente de variación	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	Sig.
Sustrato	1	200.0	200.00	6.000	0.031	*
Concentración	2	3175.0	1587.50	47.63	0.000	***
Sustrato $\times$ Concentración	2	675.0	337.50	10.12	0.003	**
Residuos	12	400.0	33.33	—	—	—

Nota. Elaboración propia de acuerdo a los datos obtenidos en Minitab. GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática. ns = no significativo ($p \geq 0.05$). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Debido a la presencia de una interacción significativa, se realizó una comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), considerando las seis combinaciones de tratamiento evaluadas. Los resultados se presentan en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

*Agrupación de medias mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey para el porcentaje de colonización de *Trametes versicolor* en bolsa*

Tratamiento	N	Media	Agrupación
Maiz25	3	71,67	A
Caña50	3	63,33	A
Caña25	3	63,33	A
Maiz50	3	41,67	B
Caña75	3	38,33	B
Maiz75	3	31,67	B

Nota. Elaboración propia de acuerdo a los resultados obtenidos en Minitab.

La prueba de Tukey permitió identificar dos grupos estadísticamente diferenciados. El grupo A estuvo conformado por los tratamientos Maíz25, Caña25 y Caña50, los cuales presentaron los mayores porcentajes de colonización, con valores comprendidos entre 63,33% y 71,67%. Por su parte, el grupo B incluyó los tratamientos Maíz50, Caña75 y Maíz75, cuyos porcentajes de colonización oscilaron entre 31,67% y 41,67%, siendo significativamente inferiores a los observados en el grupo A.

Estos resultados evidencian que las formulaciones con menores proporciones de residuo agrícola favorecieron una colonización más eficiente del sustrato. No obstante, la existencia de una interacción significativa indica que la magnitud de este efecto no fue idéntica para ambos residuos agrícolas. Mientras que el tratamiento Maíz25 alcanzó el mayor porcentaje de colonización del estudio (71,67%), el incremento de la proporción de residuo produjo una reducción progresiva de la colonización en los tratamientos formulados con maíz. En el caso de la caña de azúcar, la disminución también fue evidente, aunque con un comportamiento menos pronunciado entre las concentraciones de 25% y 50%.

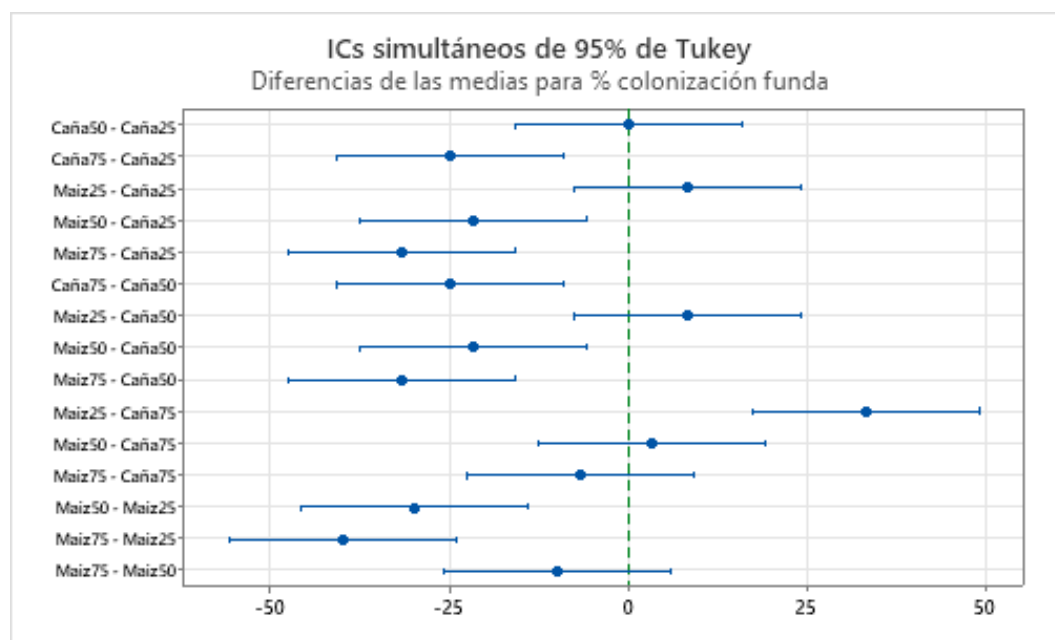
La **Figura 5** presenta los intervalos de confianza simultáneos de Tukey para las diferencias entre medias. En general, las comparaciones entre tratamientos pertenecientes a distintos grupos estadísticos mostraron diferencias significativas, mientras que las comparaciones entre tratamientos incluidos dentro de una misma agrupación tendieron a presentar intervalos que incluyen el valor cero, indicando ausencia de diferencias estadísticas entre ellos.

Los resultados obtenidos sugieren que el aumento de la proporción de residuo agrícola por encima del 50% reduce la capacidad de colonización de *Trametes versicolor* en condiciones de cultivo sólido. Este comportamiento coincide con lo reportado por (Desisa et al., 2024), quienes observaron que elevadas proporciones de materiales lignocelulósicos pueden limitar el avance micelial debido a cambios en las propiedades físicas y en la disponibilidad de nutrientes del sustrato. En consecuencia, las formulaciones

con menores proporciones de residuo agrícola y mayor participación del material estructurante proporcionaron las condiciones más favorables para el establecimiento y expansión del micelio durante la fase de colonización.

Figura 5.

*Intervalos de confianza simultáneos de Tukey (95%) para las diferencias de medias del porcentaje de colonización micelial de *Trametes versicolor* en bolsa*



Nota. Imagen obtenida de Minitab. Intervalos de confianza simultáneos de Tukey al 95% para las diferencias de medias del porcentaje de colonización en funda de *Trametes versicolor*.

Este patrón confirma que la concentración de residuo agrícola fue uno de los factores más influyentes sobre la colonización del sustrato, observándose que las formulaciones con 25% de residuo presentaron los mayores porcentajes de colonización, mientras que las formulaciones con 75% registraron los valores más bajos. No obstante, la interacción significativa entre el tipo de sustrato y la concentración indica que la magnitud de este efecto no fue exactamente igual para ambos residuos agrícolas.

Los resultados obtenidos en la fase de cultivo en placa revelaron patrones complementarios entre las variables evaluadas. Para el porcentaje de colonización al día 4, el análisis de varianza factorial no detectó efectos significativos del tipo de sustrato, de la concentración ni de la interacción entre ambos factores, lo que sugiere que durante las etapas iniciales del crecimiento micelial *Trametes versicolor* presentó una capacidad de colonización similar en todas las formulaciones evaluadas. Este comportamiento puede estar asociado a la fase de adaptación inicial del micelio, en la cual el hongo aún no depende completamente de la degradación de los componentes lignocelulósicos del sustrato para sostener su crecimiento (Tišma et al., 2021).

En contraste, la tasa de crecimiento micelial diaria sí mostró una respuesta significativa frente a la concentración del residuo agrícola. Las concentraciones de 25% y 50% presentaron velocidades de crecimiento similares entre sí, mientras que la concentración de 75% produjo una disminución significativa de esta variable. Este comportamiento podría estar relacionado con modificaciones en las propiedades físicas y nutricionales del medio de cultivo a medida que aumenta la proporción de biomasa lignocelulósica, afectando la disponibilidad de nutrientes y el avance inicial del micelio. Resultados similares han sido reportados por **(Desisa et al., 2024)**, quienes observaron una reducción en la velocidad de crecimiento de especies del género *Trametes* cuando se emplearon formulaciones con elevadas proporciones de materiales lignocelulósicos.

Al trasladar la evaluación al sistema de cultivo en funda, las diferencias entre tratamientos se hicieron más evidentes. El factor concentración presentó el mayor efecto estadístico sobre el porcentaje de colonización ($F = 47,625$; $p < 0,001$), demostrando que la proporción de residuo agrícola incorporada al sustrato influye de manera importante en el establecimiento y expansión del micelio. Las formulaciones con 25% de residuo agrícola mostraron los mayores porcentajes de colonización, mientras que los tratamientos con 75% registraron los valores más bajos. Este comportamiento coincide con observaciones realizadas en otros estudios, donde elevadas proporciones de materiales lignocelulósicos han sido asociadas con una colonización más lenta debido a cambios en la estructura física del sustrato y a una menor disponibilidad inicial de compuestos fácilmente aprovechables por el micelio **(Manvir et al., 2025)**.

Desde una perspectiva biotecnológica, los resultados obtenidos demuestran que tanto los residuos de maíz como los de caña de azúcar poseen potencial para ser utilizados como componentes de sustratos destinados al cultivo de *Trametes versicolor*. Sin embargo, los mayores niveles de colonización se alcanzaron cuando estos residuos se incorporaron en proporciones moderadas, particularmente al 25%. Entre las formulaciones evaluadas, el tratamiento Maíz 25 presentó el mayor porcentaje de colonización (71,67%), seguido por Caña 25 y Caña 50 (63,33%). Estos resultados sugieren que la valorización de residuos agrícolas mediante el cultivo de hongos ligninolíticos constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible, siempre que las proporciones empleadas permitan mantener condiciones favorables para el desarrollo micelial.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de los residuos agrícolas de maíz (*Zea mays*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), así como del aserrín utilizado como material estructurante, permitió comprobar que estos materiales poseen características compatibles con su empleo como sustratos lignocelulósicos para el cultivo de *Trametes versicolor*. El maíz presentó un mayor contenido de nitrógeno, proteína y cenizas, mientras que la caña de azúcar destacó por su aporte en carbohidratos. Por su parte, el aserrín contribuyó principalmente con propiedades estructurales favorables para la aireación y estabilidad del sustrato. En conjunto, los resultados confirman que estos residuos agrícolas constituyen materias primas con potencial para su valorización biotecnológica mediante el cultivo de hongos ligninolíticos.
- La evaluación del crecimiento y la colonización micelial demostró que *Trametes versicolor* fue capaz de desarrollarse en todas las formulaciones evaluadas. En las pruebas realizadas en placa no se observaron diferencias significativas en el porcentaje de colonización durante las etapas iniciales de crecimiento, aunque la tasa de crecimiento micelial disminuyó cuando se emplearon concentraciones elevadas de residuo agrícola. En las pruebas realizadas en bolsas se evidenció una mayor capacidad de colonización en las formulaciones con menores proporciones de residuo agrícola, destacándose el tratamiento T4 (25% maíz – 75% aserrín), que alcanzó el mayor porcentaje promedio de colonización (71,67%). Sin embargo, ninguna de las formulaciones produjo cuerpos fructíferos durante el período experimental, por lo que no fue posible evaluar parámetros productivos como eficiencia biológica o rendimiento.
- El análisis estadístico permitió determinar que la concentración de residuo agrícola fue el factor más importante en el proceso de colonización de *Trametes versicolor* en sistema de funda. La prueba de comparación múltiple de Tukey identificó diferencias significativas entre tratamientos, agrupando en los niveles superiores de colonización a las formulaciones con 25% de residuo agrícola. Los resultados obtenidos mostraron que la incorporación moderada de residuos de maíz y caña de azúcar favorece el establecimiento y expansión del micelio, mientras que concentraciones elevadas reducen la capacidad de colonización. En consecuencia, las formulaciones con 25% de residuo agrícola y 75% de aserrín representaron las condiciones más favorables para el desarrollo micelial de *Trametes versicolor* bajo las condiciones evaluadas.

4.2. Recomendaciones

- Estandarizar las condiciones de recolección, transporte y almacenamiento de los residuos agrícolas utilizados como sustrato, registrando variables como tiempo transcurrido desde la cosecha, humedad inicial y condiciones de conservación. Esto permitirá reducir la variabilidad entre lotes de materia prima y mejorar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en futuros estudios.
- Incorporar márgenes de contingencia en el cronograma experimental cuando se trabaja con organismos vivos cuyo suministro depende de proveedores externos, para contemplar períodos de colonización de al menos 25 a 30 días, garantizar la disponibilidad de un inóculo de reserva certificado y verificar la viabilidad del micelio.
- Evaluar nuevas formulaciones de sustrato utilizando concentraciones de residuo agrícola iguales o inferiores al 25%, dado que estas presentaron los mayores porcentajes de colonización micelial. De igual manera, sería conveniente analizar la incorporación de suplementos nitrogenados o materiales estructurantes alternativos que permitan optimizar las condiciones físicas y nutricionales del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Peñaloza, G. Stella. (2022). *Procesos microbianos de eliminación de contaminantes en biorremediación Gloria Stella Acosta Peñaloza*.
- Alaneme, K. K., Anaele, J. U., Oke, T. M., Kareem, S. A., Adediran, M., Ajibuwa, O. A., & Anabaranze, Y. O. (2023). Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. *Alexandria Engineering Journal*, 83, 234–250. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2023.10.012>
- Atilano-Camino, M. M., Álvarez-Valencia, L. H., García-González, A., & García-Reyes, R. B. (2020). Improving laccase production from *Trametes versicolor* using lignocellulosic residues as cosubstrates and evaluation of enzymes for blue wastewater biodegradation. *Journal of Environmental Management*, 275, 111231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111231>
- Atiwesh, G., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T. A. T. (2022). Lignin degradation by microorganisms: A review. *Biotechnology Progress*, 38(2), e3226. <https://doi.org/10.1002/btpr.3226>
- Baars, J. J. P., Scholtmeijer, K., Sonnenberg, A. S. M., & van Peer, A. (2020). Critical Factors Involved in Primordia Building in *Agaricus bisporus*: A Review. *Molecules*, 25(13). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25132984>
- Belito, E., Montes, S., Montes, M., Cruz, D., & Quintana Fredy. (2024). Inventario de hongos xilófagos y su impacto en la degradación estructural de la madera en bosques de Eucalipto, Aliso y Pino del Centro Poblado de Viñas, Tayacaja-Huancavelica. *FitoVida*, 3(1), 26–34. <https://doi.org/10.56275/FITOVIDA.V3I1.36>
- Camacho-Morales, R. L., Gerardo-Gerardo, J. L., Guillén Navarro, K., & Sánchez, J. E. (2017). Producción de enzimas ligninolíticas durante la degradación del herbicida paraquat por hongos de la pudrición blanca. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(2), 189–196. <https://doi.org/10.1016/J.RAM.2016.11.004>
- Campi, M., Grassi, E., Armoa, J., Campuzano, E., López, T., Mancuello, C., & Martínez, M. (2021). Evaluación del crecimiento de macrohongos de interes biotecnológico en residuos agroindustriales y maderero. *Steviana*, 8(2), 59–67. https://doi.org/10.56152/StevianaFacenV8N2A3_2016
- Castro Torres, O. V. (2022). *Análisis comparativo del consumo de recursos en procesos que sguen una ruta tradicional o biotecnológica : Análisis comparativo del consumo de recursos entre una ruta clásica y una biotecnológica, utilizadas para la deslignificación de pulpas kraft en la....* <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22439>

- Cazier, E. A., Pham, T. N., Cossus, L., Abia, M., Ilc, T., & Lawrence, P. (2024). Exploring industrial lignocellulosic waste: Sources, types, and potential as high-value molecules. *Waste Management*, 188(8), 11–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.029>
- Del Río, J. C., Marques, G., Lino, A. G., Lima, C. F., Colodette, J. L., & Gutiérrez, A. (2015). Lipophilic phytochemicals from sugarcane bagasse and straw. *Industrial Crops and Products*, 77, 992–1000. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.09.064>
- Desisa, B., Muleta, D., Jida, M., Dejene, T., Goshu, A., Negi, T., & Martin-Pinto, P. (2024a). Domestication of wild-growing Turkey tail mushroom (*Trametes versicolor*) from Ethiopian forests on augmented agro-industrial byproducts. *Mycological Progress* 2024 23:1, 23(1), 62-. <https://doi.org/10.1007/S11557-024-01993-X>
- Díaz, R., Díaz-Godínez, G., Díaz, R., Díaz-Godínez, & G. (2022). Substrates for mushroom, enzyme and metabolites production: A review. *JEnvB*, 43(3), 350–359. <https://doi.org/10.22438/jeb/43/3/MRN-3017>
- Diosma, G., Saparrat, M. C. N., Balatti, P. A., & Saparrat, M. C. N. (2025). *Metabolismo del carbono: degradación microbiana de lignocelulosa y formación de sustancias húmicas*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/183452>
- 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>
- García Baltazar, J. G. (2024). *Prospección de hongos para degradar biomasa vegetal a partir de muestras de ambientes salinos*. . <https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/4607/GABJLS04.pdf?sequence%20e=1>
- Han, J., Sun, R., Huang, C., Xie, H., Gao, X., Yao, Q., Yang, P., Li, J., & Gong, Z. (2024). Effects of Different Carbon and Nitrogen Ratios on Yield, Nutritional Value, and Amino Acid Contents of *Flammulina velutipes*. *Life*, 14(5), 598. <https://doi.org/10.3390/LIFE14050598>
- Hao, G., & Barker, G. C. (2022). Fatty acid secretion by the white-rot fungus, *Trametes versicolor*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 49(1), 83. <https://doi.org/10.1093/JIMB/KUAB083>
- Hernández, V. (2025, September 19). *El maíz (Zea mays): un tesoro alimenticio*. [https://books.google.com.ec/books?id=9CqIEQAAQBAJ&dq=El+ma%C3%ADZ+\(Zea+mays+](https://books.google.com.ec/books?id=9CqIEQAAQBAJ&dq=El+ma%C3%ADZ+(Zea+mays+)

L.)+es+una+gram%C3%ADnea+de+origen+mesoamericano+que+constituye+uno+de+los+cultivos+m%C3%AAs+importantes+del+mundo+y+el+de+mayor+producci%C3%B3n+en+Ecuador.+Durante+la+cosecha,+se+generan+grandes+cantidades+de+residuos+agr%C3%ADcolas+conocidos+como+rastrojo,+que+incluyen+tallos,+hojas,+br%C3%A1cteas+(totora),+olote+o+mazorca+desgranada,+y+ra%C3%ADces.+Se+estima+que+por+cada+tonelada+de+grano+cosechado+se+generan+entre+1+y+2+toneladas+de+rastrojo+&lr=&hl=es&source=gb_s_navlinks_s

- Hsin, K. T., Lee, H. T., Huang, Y. C., Lin, G. J., Lin, P. Y., Lin, Y. C. J., & Chen, P. Y. (2025). Lignocellulose degradation in bacteria and fungi: cellulosomes and industrial relevance. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1583746. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2025.1583746/FULL>
- 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>
- Jimenez, V. (2018). *Desarrollo de una metodología mediante acoplamiento de bioaumentación, bioestimulación y bioventeo para la remediación de un suelo costero contaminado con hidrocarburos intemperizados*. <https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/100>
- Jović, J., Hao, J., Kocić-Tanackov, S., & Mojović, L. (2020). Improvement of lignocellulosic biomass conversion by optimization of fungal ligninolytic enzyme activity and molasses stillage supplementation. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2020 12:7, 12(7), 2749–2765. <https://doi.org/10.1007/S13399-020-00929-1>
- Justo, A., & Hibbett, D. S. (2011). Phylogenetic classification of *Trametes* (Basidiomycota, Polyporales) based on a five–marker dataset. *TAXON*, 60(6), 1567–1583. <https://doi.org/10.1002/TAX.606003>
- Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhruue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., Vadthanarat, S., & Lumyong, S. (2020). Cultivation of Mushrooms and Their Lignocellulolytic Enzyme Production Through the Utilization of Agro-Industrial Waste. *Molecules* 2020, Vol. 25, 25(12). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25122811>
- Kyawt, Y. Y., Aung, M., Xu, Y., Zhou, Y., Li, Y., Sun, Z., Zhu, W., & Cheng, Y. (2024). Methane production and lignocellulosic degradation of wastes from rice, corn and sugarcane by natural anaerobic fungi-methanogens co-culture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2024 40:4, 40(4), 109-. <https://doi.org/10.1007/S11274-024-03938-8>
- Lagos Burbano, E., Cardona Iglesias, J. L., & Castro Rincón, E. (2022). Subproductos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.): usos en alimentación animal y producción de compost.

- Subproductos de La Caña de Azúcar (Saccharum Officinarum L.): Usos En Alimentación Animal y Producción de Compost*. <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.MANUAL.7406238>
- Levicoy, V., & Morales, R. (2023). Biodegradación in vitro de *Trametes versicolor* y *Schizophyllum commune* como potenciales biocontroles de *Acacia melanoxylon* en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 44(1). <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100047>
- Li, C., Kerner, P., Williams, C. L., Hoover, A., & Ray, A. E. (2020). Characterization and Localization of Dynamic Cell Wall Structure and Inorganic Species Variability in Harvested and Stored Corn Stover Fractions as Functions of Biological Degradation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(18), 6924–6934. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.9B06977>
- Liadi, M. A., Ayodele, T. O., Tijani, A., Bello, I. A., Chandra Sarker, N., Igathinathane, C., & Ademola, H. M. (2026). From Biomass to Biofabrication: Advances in Substrate Treatment Technologies for Fungal Mycelium Composites. *Clean Technologies 2026, Vol. 8*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL8020030>
- Liang, C. H., Wu, C. Y., Li, P. H., & Liang, Z. C. (2025). Biological Efficiency, Nutritional Composition, and Bioactive Compound Contents of the Lung Oyster Mushroom *Pleurotus pulmonarius* (Agaricomycetes) Cultivated on Spent Mushroom Substrates. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 27(6), 35–44. <https://doi.org/10.1615/INTJMEDMUSHROOMS.2025058216>
- Lorenzana-Moreno, A. V., Lara, H. L., Corona, L., Granados, O., & Márquez-Mota, C. C. (2023). Production of 17 strains of edible mushroom grown on corn stover and its effect on the chemical composition and ruminal in vitro digestibility of the residual substrate. *PLOS ONE*, 18(5), e0286514. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0286514>
- Manvir, Ojha, R. K., Fayaz, A., & Kaundal, M. (2025). Sustainable Substrates for Mushroom Production: A Review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(8), 447–460. <https://doi.org/10.9734/JABB/2025/V28I82720>
- Melo Parra, C. G. (2021). *Evaluación de la colonización del hongo Pleurotus ostreatus en sustratos lignocelulósicos*. Fundación Universidad de América. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8665>
- Mixquititla-Casbis, G., Villegas-Torres, Ó. G., Andrade-Rodríguez, M., & Sotelo-Nava, H. (2022). Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8(1). <https://doi.org/10.30973/AAP/2022.8.0081007>

- Montgomery, D. (2022). Multiparameter design optimisation of a mud-based natural draft biomass cookstove using response surface methodology and desirability function. *Scientific Reports*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-025-29684-X>
- Morales, C. M., Rodríguez, C. M., Venegas, I. V., Quintanilla, B. V., & Muñoz, V. V. (2023). Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca. *Tecnología En Marcha*, ISSN 0379-3982, ISSN-e 2215-3241, Vol. 36, Nº. 1, 2023, Págs. 97-105, 36(1), 97–105. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5997>
- Mou, C., Gong, Y., Chen, L., Martin, F., Kang, H., & Bian, Y. (2023). Comparative analysis of simulated in-situ colonization and degradation by *Lentinula edodes* on oak wafer and corn stalk. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1286064>
- Muñoz Castillo, F. A. (2020). *Sistematización de pruebas de crecimiento en medios de cultivo sólido para hongos silvestres descomponedores de madera en el contexto del desarrollo de biomateriales de micelio. Caso de estudio: Monumento Abierto*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178354>
- Nair, L. G., & Verma, P. (2025). Harnessing carbon potential of lignocellulosic biomass: advances in pretreatments, applications, and the transformative role of machine learning in biorefineries. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 97. <https://doi.org/10.1186/S40643-025-00935-Z>
- Ocampo, A. (2021). *Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la producción de hongos funcionales*. <https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/2507>
- Quiñones Cerna, C. E., Robles Castillo, H. M., Salirrosas Fernández, R. D., & Cruz Monzon, J. A. (2025). *GUÍA DE LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOPRODUCTOS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES* (Primera, Vol. 1). Fondo Editorial Universitario. https://www.researchgate.net/profile/Claudio-Quinones-Cerna/publication/396400910_GUIA_DE_LABORATORIO_DE_MICROBIOLOGIA_PARA_LA_PRODUCCION_DE_BIOPRODUCTOS_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_AGROINDUSTRIALES/links/68e95e64ffdca73694b6d835/GUIA-DE-LABORATORIO-DE-MICROBIOLOGIA-PARA-LA-PRODUCCION-DE-BIOPRODUCTOS-A-PARTIR-DE-RESIDUOS-AGROINDUSTRIALES.pdf
- Ramezan, D., Alizade Jahan Abadi, B., Samzade Kermani, A., Pirnia, M., & Farrokhzad, Y. (2021). Cultivation of Turkey Tail Mushroom (*Trametes versicolor*) on Lignocellulosic Wastes and Evaluation of Substrate Bioconversion. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* 2021 91:4, 91(4), 777–787. <https://doi.org/10.1007/S40011-021-01269-4>

- Ramos, G., Roque, Q., Mendoza, R., García Ramos, L. C., de El Salvador, U., Salvador, E., Salvador Quirós Roque, E. V., & Salvador Rosales Mendoza, E. LE. (2022). Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 1979–1991. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15041>
- Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., Barranzuela, J. L., Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). Physicochemical characterization of industrial and hand-crafted sugarcane bagasse as construction material. *Información Tecnológica*, 33(2), 247–258. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000200247>
- Reverter, F. (2020). *Análisis de la varianza (ANOVA)*. Universitat Oberta de Catalunya.
- Riera, M. A., Mero, M. L., & Párraga, M. A. T. (2024). Residuos revalorizables: una oportunidad de desarrollo manabita. *Revista ESPAMCIENCIA, ISSN-e 1390-8103, Vol. 15, N°. 1, 2024 (Ejemplar Dedicado a: REVISTA ESPAMCIENCIA 2024), Págs. 12-20, 15(1), 12–20.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9642347&info=resumen&idioma=ENG>
- Rodríguez, A., Espinosa, E., & Martín, C. (2023). Special Issue “Lignocellulosic Biomass II.” *Molecules*, 28(17), 6230. <https://doi.org/10.3390/molecules28176230>
- Ruiz, W. C., Cano, B. C., & Jiménez, C. I. (2024). Apreciación de residuos orgánicos agrícolas como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus pulmonarius*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 26(1), 81–90. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.111029>
- Schritt, H., Vidi, S., & Pleissner, D. (2021). Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127910. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127910>
- Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M., Tofani, G., Jasiukaitytė-Grojzdek, E., Dace, E., Kikas, T., Marchetti, J. M., Rajić, M., Yildiz, G., & Billen, P. (2024). Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. *RSC Sustainability*, 2(12), 3730–3749. <https://doi.org/10.1039/D4SU00342J>
- Sidana, A., & Farooq, U. (2014). Sugarcane Bagasse: A Potential Medium for Fungal Cultures. *Chinese Journal of Biology*, 2014(1), 840505. <https://doi.org/10.1155/2014/840505>
- Singh, A. K., Fernandez-Lafuente, R., Schmidt, J. E., Boczkaj, G., & Bilal, M. (2024). Biocatalytic Functionalities of Lignin Peroxidase-Based Systems in Lignin Depolymerization and Pollutants Removal from Environmental Matrices. *Current Pollution Reports* 2024 10:3, 10(3), 345–361. <https://doi.org/10.1007/S40726-024-00310-0>

- SIPA. (2024). <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/acerca-del-sipa/sistema-informacion-publica-agropecuaria>
- Smith, W. A., Wendt, L. M., Bonner, I. J., & Murphy, J. A. (2020). Effects of Storage Moisture Content on Corn Stover Biomass Stability, Composition, and Conversion Efficacy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 716. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2020.00716>
- Suwannarach, N., Kumla, J., Zhao, Y., & Kakumyan, P. (2022). Impact of Cultivation Substrate and Microbial Community on Improving Mushroom Productivity: A Review. *Biology 2022*, Vol. 11, 11(4). <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY11040569>
- Thakur, M. P. (2020). Advances in mushroom production: key to food, nutritional and employment security: A review. *Indian Phytopathology 2020 73:3*, 73(3), 377–395. <https://doi.org/10.1007/S42360-020-00244-9>
- Thompson, M., Owen, L., Wilkinson, K., Wood, R., & Damant, A. (2002). A comparison of the Kjeldahl and Dumas methods for the determination of protein in foods, using data from a proficiency testing scheme. *The Analyst*, 127(12), 1666–1668. <https://doi.org/10.1039/B208973B>
- Thuy, T., Van Le, V., Thi, H., Nguyen, L., Thi, T., & Xuan, N. (2021). Nutritional requirements for the enhanced mycelial growth and yield performance of *Trametes versicolor*. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.7324/JABB.2021.9101>
- Tišma, M., Bucic-Kojic, A., & Planinic, M. (2021). Bio-based products from lignocellulosic waste biomass: A state of the art. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 35(2), 139–156. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2021.1931>
- Torres Vinuesa, F. A., & Carem Francelys, P. F. (2025). *Bioactividad de polisacáridos de trametes versicolor en el tratamiento de pacientes con cáncer. Una revisión sistemática de la literatura*. <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/9a7c3179-3592-4ba6-8db7-722b4c645515>
- Trametes versicolor*. (2020). *Taxonomy Browser* . <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?mode=info&id=5325>
- Valerio Vega, M., & Montoya, D. (2024). Eficacia del polisacárido de *Trametes versicolor* en la inhibición tumoral y la modulación inmunitaria. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 6(5). <https://doi.org/10.59169/PENTACIENCIAS.V6I5.1237>
- Vallejo, M. de la L. (2021). *Utilización de Lacasa de Pleurotus ostreatus y su Biomasa Residual para la Degradación de Colorantes Azoicos y la Remoción de Metales en Aguas Residuales*.

- Vandelook, S., Bassleer, B., Elsacker, E., & Peeters, E. (2024). Effects of Orange Peel Extract on Laccase Activity and Gene Expression in *Trametes versicolor*. *Journal of Fungi*, 10(6), 370. <https://doi.org/10.3390/JOF10060370/S1>
- Vega Leyva, C. A. (2025). *Mejoramiento de la calidad de los suelos para la obtención del compost mediante los residuos orgánicos en la ciudad de Ica*. <https://hdl.handle.net/20.500.13028/6174>
- Vengoechea, F. (2022). *Esterilización vs Pasteurización: La Ciencia del Control Microbiano en Fungicultura*. <https://www.setasdesiecha.com/esterilizacion-para-cultivar-setas/>
- Waing, K., & Dulay, M. (2025). Optimization of Nutritional Requirements for the Mycelial Growth of *Trametes cubensis* and *Lentinus velutinus*. *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY*. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2409>