

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



**EFFECTO DEL USO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS UTILIZADO EN LA
PRODUCCIÓN DE PLEUROTUS DJAMOR PARA LA ELABORACIÓN
DE UN SNACK**

POR:

JACIBE JANET JARQUÍN GARCÍA

**PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE**

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO.

JUNIO 2026

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

EFFECTO DEL USO DE RESIDUOS AGRICOLAS UTILIZADO EN LA
PRODUCCION DE PLEUROTUS DJAMOR PARA LA ELABORACION DE UN
SNACK.

Por:

JACIBE JANET JARQUIN GARCIA

TESIS

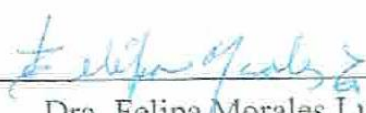
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

Fue dirigida y aprobada por el siguiente comité Asesor:



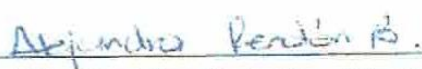
Dr. Mario Alberto Cruz Hernández
Director



Dra. Felipa Morales Luna
Asesor



Dra. Ruth Elizabeth Belmares Cerda
Asesor



M.C. Alejandra Estefanía Rendón Benjumea
Asesor



M.C. Pedro Carrillo López
Coordinador de la División de Ciencia Animal



Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

DECLARATORIA DE NO PLAGIO

DECLARO QUE:

El trabajo de investigación titulado “Efecto del uso de residuos agrícolas utilizado en la producción de pleurotus djamor para la elaboración de un snack.” es una producción personal, donde no se ha copiado, replicado, utilizado ideas, citas integrales e ilustraciones diversas, obtenidas de cualquier tesis, obra intelectual, artículo, memoria, (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor.

En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que en caso de comprobarse plagio en el texto o que no se respetaron los derechos de autor; esto será en objeto de sanciones del Comité Editorial y/o legales a las que haya lugar; quedando, por tanto, anulado el presente documento académico sin derecho a la aprobación del mismo, ni a un nuevo envío.

ATENTAMENTE



Jacibe Janet Jarquín García

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE CIENCIA ANIMAL

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

EFFECTO DEL USO DE RESIDUOS AGRICOLAS UTILIZADO EN LA
PRODUCCION DE PLEUROTUS DJAMOR PARA LA ELABORACION DE UN
SNACK.

Por:

JACIBE JANET JARQUIN GARCIA

TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

APROBADA



Dr. Mario Alberto Cruz Hernández
Presidente



Dra. Felipa Morales Luna
Vocal



Dra. Ruth Elizabeth Belmares Cerda
Vocal



M.C. Alejandra Estefanía Rendón Benjumea
Vocal

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

Agradecimientos y dedicatorias

Agradecimientos

*Principalmente agradezco a Dios por darme la virtud, la fuerza, la sabiduría para superar los obstáculos a lo largo de mi vida, mi más infinita gratitud a mis padre **Ortencia G. y Juan J.**, especialmente a mi madre por ser la que más impulsa, me exige, me motiva y sobre todo me apoya incondicionalmente en cada uno de mis pasos, gracias a mi hermano por ser siempre estar para mí.*

*Doy gracias al **Dr. Mario Cruz, Dra. Ruth Belmares, Dra. Felipa Morales, M.C Alejandra Rendón**, por ser un gran apoyo a lo largo de este proyecto, gracias por abrirme las puertas de sus espacios de trabajo, por la confianza, por creer en mí. Les agradezco por siempre regalarme su tiempo y compartir conmigo sus sabios conocimientos.*

Agradezco a mi casa de estudios, por todo lo que me ofreció a lo largo de mi estancia como estudiante, por ella conocí Saltillo, y personas muy maravillosas.

Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios por ser guía y fortaleza en el transcurso de mi camino profesional, y ti que estas escribiendo estas dedicatorias, hoy cosechas el fruto de tu esfuerzo, trabajo, empeño y dedicación.

A mi familia

*A mi madre **Ortencia García**, a mi padre Juan Jarquín, a mi hermano **Ángel Jarquín G.** y familia, por ser mi apoyo incondicional, ser mi inspiración para salir adelante, por darme la oportunidad de estudiar a pesar de las dificultades y por ser mi motor en todo momento que sin ellos no hubiera sido posible este logro.*

A mis abuelos, a pesar que ya no se encuentran conmigo los llevo en el corazón siempre.

*A **Ángel M. C.**, por comprender las dificultades de tener una relación a distancia, que no siempre es fácil, más sin embargo con su amor todo es posible.*

*A mis padrinos **Doni y Araceli** que siempre han estado para mi apoyándome, a cada uno de mis pasos, mis tíos (as) por parte de mi mamá, a mi tío Heladio J. y familia, y a todos esos amigos que la lista es infinita.*

A mis amigos(as)

*Queridos amigos(as) les dedico este trabajo porque los conocí en nuestra Narrito algunos por clases, otros por deporte y otros fueron mi familia foránea, **Vané B., Ana M., Luz Mtz., Ana Pao, Jaqueline D., Eli Vazq., Zari Gtz., Pablo B., Javier M., Liz, Natalia H., Mariela, Natalia D., Ing Aldo, Alexis M.***

Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Justificación.....	12
3. Objetivos.....	14
3.1. Objetivo General	14
3.2. Objetivo Específicos	14
4. Antecedentes	15
4.1. Importancia de los hongos del género <i>Pleurotus</i>	15
4.2. Sustratos lignocelulósicos y aprovechamiento de residuos.....	16
4.2.1. El agave y la avena como sustratos emergentes en México.....	17
4.3. Condiciones del cultivo de <i>Pleurotus djamor</i>	17
4.4. Harinas funcionales y desarrollo de nuevos productos	19
4.4.1. Desarrollo de snacks y productos funcionales.....	20
4.5. Propiedades nutricionales de la harina de <i>Pleurotus djamor</i>	21
4.5.1. Cinética de secado y conservación de nutrientes	21
4.5.2. Biodisponibilidad de nutrientes y quitina.....	21
4.5.3. Propiedades nutrimentales.....	22
4.6. Propiedades sensoriales y aceptación del consumidor	23
5. Metodología.....	23
5.1. Recolección de sustratos	23
5.2. Caracterización bromatológica.....	24
5.3. Preparación e inoculación del sustrato con <i>Pleurotus djamor</i>	25
5.4. Proceso de producción	26
5.5. Obtención de la harina de <i>Pleurotus djamor</i>	27
5.5.2. Molienda y tamizado.....	28
5.6. Formulación y cocción	29
5.7. Análisis sensorial del snack tipo churrito	30
6. Resultados y discusión.....	31
6.1. Caracterización bromatológica del cuerpo fructífero de <i>Pleurotus djamor</i>	31
6.2. Cinética de producción de setas de <i>Pleurotus djamor</i>	33
6.3. Eficiencia biológica, rendimiento y tasa de producción.....	34
6.4. Caracterización bromatológica de los sustratos antes y después del cultivo de <i>Pleurotus djamor</i>	35

6.4.1.	Materia seca total y humedad	35
6.4.2.	Contenido de minerales	36
6.4.3.	Contenido de proteína	37
6.4.4.	Contenido de lípidos	37
6.4.5.	Fibra cruda	38
6.4.6.	Carbohidratos	38
6.5.	Análisis sensorial	39
7.	Conclusión	41
8.	Bibliografía	44

Abstract / Resumen

El presente trabajo integra la valorización de residuos agrícolas como estrategia para desarrollar alimentos funcionales, partiendo de la evaluación de distintos sustratos, olote y zacate de maíz, forraje de avena y pencas de agave (*A. angustifolia*), caracterizados mediante análisis fisicoquímicos que evidenciaron su naturaleza fibrosa y alto contenido de celulosa, lo que los hace adecuados para el cultivo de seta rosa (*Pleurotus djamor*). A lo largo de aproximadamente 70 días desde la siembra, se observó el desarrollo de cuerpos fructíferos en todos los sustratos, permitiendo comparar su desempeño en términos de rendimiento, tasa de producción y eficiencia biológica, así como el perfil nutrimental de los hongos obtenidos. Los análisis bromatológicos mostraron diferencias claras entre sustratos, destacando la paja de avena como el más eficiente, con un 94% de materia seca y una eficiencia biológica del 126.88%, superando ampliamente al olote de maíz, que presentó apenas un 33.02%. Estos resultados no solo indican variaciones en productividad, sino también implican diferencias en la viabilidad económica y técnica del proceso, algo que a menudo se subestima cuando se asume que cualquier residuo lignocelulósico es igualmente útil. Una vez cosechados, los hongos fueron sometidos a deshidratación a 75 °C y posteriormente molidos para obtener una harina fina. Esta harina se incorporó en distintas proporciones a harina convencional de maíz y sazónadores para formular un snack tipo “churrito”. El producto fue horneado a 160 °C y evaluado sensorialmente por panelistas no entrenados, quienes determinaron las formulaciones más aceptables en función de textura, sabor, aroma, color y retrogusto. En términos nutricionales, el snack final presentó un contenido graso inferior al 1%, lo que contrasta con muchos productos comerciales similares y sugiere una mejora en el perfil nutricional. Además, la incorporación de harina de seta no solo incrementó el valor nutrimental, sino que también aportó propiedades funcionales, reforzando la idea de que el reaprovechamiento de biomasa residual puede trascender el discurso de sostenibilidad y traducirse en productos alimenticios viables. No obstante, conviene matizar: aunque los resultados son prometedores, la evaluación sensorial con panelistas no entrenados y la falta de comparación directa con estándares industriales limitan el alcance de las conclusiones sobre aceptación en mercado real.

Palabras clave: *Pleurotus Djamor*, sustratos, Funcional, sustentable.

1. Introducción

La producción de hongos comestibles, particularmente del género *Pleurotus*, se ha consolidado como una de las estrategias biotecnológicas más eficientes para la obtención de proteína no convencional de alta calidad, debido a su valor nutritivo, bajo impacto ambiental y accesibilidad económica, lo que contribuye a la seguridad alimentaria. En este contexto, *Pleurotus djamor* (seta rosa) destaca por su rápido ciclo de cultivo entre 25 y 35 días tras la inoculación, y su capacidad de adaptación a diversas condiciones del territorio mexicano. Sin embargo, atribuir su eficiencia únicamente a estas características biológicas sería reduccionista, ya que existe consenso en que su rendimiento y eficiencia biológica dependen directamente de la composición lignocelulósica del sustrato empleado, lo que hace necesario evaluar residuos agrícolas como rastrojo y olote de maíz, paja de avena y subproductos del agave. En México, esta problemática adquiere especial relevancia debido al papel central del maíz (*Zea mays*) en la soberanía alimentaria y a la gran cantidad de biomasa residual generada. A estos se suman residuos de avena y agave (*A. angustifolia*) que, por limitaciones técnicas, no han sido plenamente aprovechados. Su uso actual, como forraje, compostaje o quema implica no solo un desaprovechamiento de recursos ricos en celulosa y hemicelulosa, sino también impactos ambientales negativos. En este sentido, la capacidad enzimática de *Pleurotus djamor* para degradar estos polímeros complejos permite transformar dichos residuos en biomasa comestible de bajo costo. No obstante, esta afirmación debe matizarse: la eficiencia del proceso depende de condiciones técnicas específicas y no siempre es replicable sin control adecuado de variables productivas. Este enfoque se inserta en una tradición histórica más amplia. Desde tiempos prehispánicos, el consumo de hongos ha formado parte de la dieta humana, con evidencias arqueológicas y usos medicinales documentados en distintas culturas. En México, los hongos han desempeñado un papel relevante tanto en la alimentación como en la medicina tradicional. A nivel global, la producción de hongos ha experimentado un crecimiento

significativo, aumentando 13.8 veces entre 1990 y 2020 hasta alcanzar 42.8 millones de toneladas (Okuda, 2022). Entre las especies más producidas destacan *Lentinula edodes* y *Pleurotus* spp. (Royse et al., 2017), siendo China responsable de aproximadamente el 93% de la producción mundial. *Lentinula edodes* es reconocido no solo como alimento, sino también por sus propiedades medicinales, que incluyen efectos potenciales contra enfermedades como el cáncer, la diabetes y la inflamación (Megersa y Tolessa, 2024).

El cultivo de hongos depende de múltiples factores físicos, químicos, biológicos y enzimáticos que interactúan entre sí, por lo que su manejo requiere una comprensión integral de estos elementos (Bellettini, 2019). En el ámbito agronómico, el aprovechamiento de residuos agrícolas como sustrato ha sido propuesto desde décadas atrás (Guzmán, 1983; Martínez et al., 1984), lo que refuerza la base teórica de este tipo de investigaciones. En el presente estudio, esta estrategia se aplica en los Valles Centrales de Oaxaca, específicamente en el municipio de San Pablo Huixtepec, donde predominan pequeños productores. Se evalúan distintos sustratos, incluyendo residuos de maíz y pencas de maguey provenientes de la industria del mezcal, así como referencias culturales al uso tradicional de especies como *Pleurotus opuntiae* (Segura, 2019). A partir de este contexto, la investigación no solo evalúa la producción y la eficiencia biológica de *Pleurotus djamor* en distintos sustratos, sino también el efecto de estos sustratos en el contenido nutrimental del cuerpo fructífero. Posteriormente, los hongos obtenidos se procesan para elaborar un snack tipo “churrito”, formulado con harinas de seta y de maíz. Este producto es sometido a una evaluación sensorial por panelistas no entrenados, en la que se analizan atributos como color, sabor, textura, aroma y retrogusto para determinar su aceptabilidad.

En conjunto, la propuesta integra el aprovechamiento de residuos agrícolas, la producción fúngica y el desarrollo de alimentos funcionales. Aunque los resultados apuntan a una alternativa viable y sustentable, es necesario reconocer limitaciones importantes: la extrapolación a escala industrial, la estandarización del proceso y la validación del producto en mercados reales siguen siendo aspectos pendientes.

2. Justificación

Esta investigación se justifica por la necesidad de crear alternativas alimentarias sustentables que, además de garantizar la seguridad alimentaria, permitan aprovechar de manera integral los residuos agrícolas y agroindustriales generados en distintas regiones de México. En este contexto, el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus*, especialmente de *Pleurotus djamor*, surge como una estrategia biotecnológica efectiva por su capacidad de transformar materiales lignocelulósicos de bajo valor en biomasa comestible con un aporte nutricional relevante. El interés en *Pleurotus djamor* reside en su ciclo de producción rápido, su adaptación a diversas condiciones ambientales y su habilidad para crecer sobre distintos residuos agrícolas como rastrojo y olote de maíz, paja de avena y subproductos del agave. Estas características permiten reducir los costos de producción en comparación con otras fuentes de proteína y facilitar sistemas de cultivo accesibles para pequeños productores rurales. Sin embargo, la eficiencia productiva del hongo depende de factores técnicos específicos, como la composición del sustrato, el manejo de humedad, la temperatura y las condiciones sanitarias, por lo que es necesario evaluar el comportamiento de diferentes materiales disponibles en la región. La importancia ambiental de la investigación es significativa, ya que gran parte de los residuos agrícolas en comunidades rurales se subutiliza o se elimina mediante prácticas como la quema a cielo abierto, lo cual contribuye a la contaminación y a la pérdida de biomasa aprovechable. Utilizar estos residuos como sustrato para cultivar hongos representa una opción de valorización biológica que puede reducir impactos ambientales y promover esquemas de economía circular en el sector agroalimentario. Además, el estudio tiene relevancia nutricional y social, ya que los cuerpos fructíferos de *Pleurotus djamor* aportan proteína, fibra, vitaminas y compuestos bioactivos que pueden enriquecer la dieta, especialmente en comunidades con acceso limitado a alimentos frescos o nutritivos. Aunque los hongos constituyen una fuente alimentaria importante, su incorporación diaria también depende de factores culturales,

sensoriales y de la aceptación del consumidor. Por ello, además de evaluar la producción y eficiencia del hongo en diferentes sustratos, esta investigación propone desarrollar un snack tipo churrito, elaborado con harinas de seta y de maíz, con el fin de crear un producto innovador y de mayor valor agregado. La evaluación sensorial permitirá determinar su aceptabilidad en aspectos como sabor, aroma, textura, color y retrogusto. Finalmente, la propuesta busca ofrecer una alternativa que integren sostenibilidad ambiental, aprovechamiento de residuos agrícolas, producción de alimentos funcionales y generación de ingresos para pequeños productores. Aunque los resultados del desarrollo experimental son prometedores, es importante llevar a cabo estudios adicionales para su implementación a mayor escala, enfocados en la estandarización del proceso, la viabilidad económica y la aceptación en el mercado.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar el efecto del uso de diferentes residuos agrícolas altamente fibrosos, como el olote de maíz, el zacate de maíz, el forraje de avena y las pencas de agave, en la producción de *Pleurotus djamor*, normalmente desechados. Serán utilizados como sustrato para la biotransformación del cuerpo fructífero en harina, con el fin de desarrollar un snack tipo “churrito” en combinación con harina de maíz, el cual presenta propiedades funcionales altamente nutritivas.

3.2. Objetivo Específicos

- Recolectar los residuos agrícolas de olote de maíz, zacate de maíz, forraje de avena y pencas de agave, para reducir el tamaño de partícula.
- Esterilizar los sustratos para evitar contaminaciones cruzadas provenientes de las muestras.
- Evaluar cinéticamente la producción del *Pleurotus djamor* en los sustratos seleccionados hasta la cosecha.
- Determinar el contenido nutrimental de los cuerpos fructíferos producidos en los sustratos.
- Evaluar la influencia de la harina de *Pleurotus djamor* en la formulación de un snack tipo “churrito”
- Determinar temperatura y tiempo de horneado para la elaboración de churritos
- Analizar sensorialmente las diferentes formulaciones para determinar la preferencia del consumidor.

4. Antecedentes

4.1. Importancia de los hongos del género *Pleurotus*

Los hongos ostra (*Pleurotus spp.*) son los segundos hongos más cultivados a nivel mundial, después del shiitake, y por delante de los hongos de los géneros *Agaricus* y *Flammulina*, que se cultivan principalmente en Asia, América y Europa (Royse et al., 2017). Las especies de *Pleurotus* son ricas en proteínas, polisacáridos, fibra, minerales y vitaminas, y además presentan actividades antitumorales, hipocolesterolémicas, inmunomoduladoras (Cohen et al., 2002), antivirales, antibacterianas (Enshasy et al., 2018), antiinflamatorias (Taofiq et al., 2015) y antioxidantes (Angelescu y Vamanu, 2015; Diamantopoulou et al., 2023).

Aparte de su perfil nutricional beneficioso y promotor de la salud, la importancia de los hongos en la cadena alimentaria radica en su capacidad para convertir los desechos en alimentos; por lo tanto, el cultivo de hongos puede respaldar con éxito un sistema de producción de economía circular sostenible. Sin embargo, el cultivo de hongos se acompaña de la producción de subproductos, como cuerpos fructíferos no conformes, micelio, tallos y sustrato agotado (Antunes et al., 2020), que deben gestionarse adecuadamente para minimizar su impacto ambiental.

Los cuerpos fructíferos deformes y los tallos rechazados se consideran desechos, pero al mismo tiempo poseen valor nutricional, ya que la composición química de los hongos deformes no difiere significativamente de la de los hongos normales (Guo et al., 2022), mientras que los tallos presentan una composición comparable a la de los cuerpos fructíferos, aunque con mayor contenido de fibra (Oyetayo et al., 2007). Por ello, el uso de residuos derivados del cultivo de hongos como alimento animal o materia prima para otros productos representa una alternativa prometedora tanto para el medio ambiente como para la producción agroalimentaria.



Figura 1. *Pleurotus djamor*

4.2. Sustratos lignocelulósicos y aprovechamiento de residuos

La utilización de residuos agrícolas como el maíz, el agave y la avena se enmarca en la tendencia global del *upcycling* alimentario. Según Sosa-Martínez et al. (2023), la matriz lignocelulósica de estos subproductos constituye la fuente de materia orgánica más abundante del planeta; sin embargo, su estructura resistente requiere procesos biotecnológicos específicos para su degradación.

Las investigaciones de Teniente-Martínez et al. (2022) destacan que la celulosa presente en residuos agrícolas posee una estructura compleja, pero es indispensable como fuente de carbono para el metabolismo energético y el crecimiento continuo del micelio de *Pleurotus*. De acuerdo con Vega et al. (2022), la hemicelulosa presente en la paja de avena facilita el inicio del cultivo, ya que sus azúcares ramificados son de los primeros compuestos asimilados por el hongo durante los primeros cinco días de incubación. La lignina actúa como un polímero protector. Sosa-Martínez et al. (2023) afirman que *Pleurotus djamor* ha evolucionado para secretar enzimas ligninolíticas termoestables, capaces de degradar fibras duras, como las del agave, incluso bajo condiciones de estrés térmico, lo que permite la asimilación eficiente de nutrientes.



Figura 2. Sustratos para la producción

4.2.1. El agave y la avena como sustratos emergentes en México

El uso de residuos de agave representa una innovación técnica reciente. Según Sosa-Martínez et al. (2023), estos residuos contienen fructanos y saponinas que no solo aportan nutrientes al hongo, sino que podrían influir en la concentración de compuestos antioxidantes en el cuerpo fructífero.

Por otro lado, la paja de avena aporta una relación carbono/nitrógeno más equilibrada. Teniente-Martínez et al. (2022) demostraron que la mezcla de residuos de maíz con avena reduce el tiempo de colonización micelial en aproximadamente un 15 %, lo que acelera el ciclo productivo total a menos de 30 días. De acuerdo con Sosa-Martínez et al. (2023) y Vega et al. (2022), el cultivo de *Pleurotus djamor* sobre rastrojo de maíz y agave implica un proceso avanzado de transformación biológica. Las enzimas ligninolíticas y celulolíticas degradan la lignina y la celulosa de los residuos agrícolas, transformándolas en proteínas, vitaminas y fibras de alto valor nutricional. Este proceso permite convertir residuos agrícolas y subproductos industriales en biomasa comestible, promoviendo la sostenibilidad y el aprovechamiento integral de los recursos.

4.3. Condiciones del cultivo de *Pleurotus djamor*

Actualmente, México produce cerca de 4 mil toneladas de setas al año, lo que representa aproximadamente el 60% de la producción total de América Latina (Gaitán, 2006). El cultivo de *Pleurotus djamor* se considera una alternativa alimentaria importante por su capacidad para producir un alimento fresco y adaptable a distintos platillos tradicionales mexicanos, además de aportar nutrientes de interés nutricional.

Los extractos bioactivos de *Pleurotus* pueden incorporarse a suplementos, nutraceuticos o alimentos funcionales (Milić, Rajković, Stamenković y Veljković, 2013).

Las condiciones de cultivo son determinantes para el desarrollo adecuado del cuerpo fructífero de *Pleurotus djamor*. Existen factores que deben controlarse desde la pasteurización del sustrato, como el pH, la temperatura, la humedad y la luz.

- **Luz**

La luz influye directamente en la coloración del cuerpo fructífero. La intensidad lumínica puede intensificar o atenuar el color rosado característico de *Pleurotus djamor*, por lo que es recomendable controlar la entrada de luz mediante recubrimientos o sistemas de sombreado.

- **Temperatura**

La temperatura afecta tanto la esterilización del sustrato como las etapas de incubación y fructificación. Las temperaturas inadecuadas pueden alterar los componentes nutricionales del sustrato y afectar el desarrollo del hongo. Los rangos óptimos de temperatura se sitúan entre 25 y 30 °C.

- **Humedad**

La humedad es esencial para el desarrollo del micelio. Dependiendo del sustrato utilizado, los valores adecuados suelen situarse entre el 60 % y el 80 % de humedad final.

- **pH**

El pH óptimo del sustrato generalmente oscila entre 6 y 7,5, según el tipo de residuo agrícola empleado.

- **Aireación y compactación del sustrato**

Como producto del metabolismo de los hongos en el sustrato, se liberan calor, CO₂, agua y otros metabolitos. Si estos no se eliminan de manera eficiente mediante los espacios porosos del sustrato, se reduce la invasión micelial debido a la acumulación excesiva. Los sustratos compactados no son adecuados para el cultivo de hongos debido a las condiciones de anaerobiosis y a la disminución del oxígeno que se generan en su interior (Silva, 2022).

4.4. Harinas funcionales y desarrollo de nuevos productos



Figura 3. Harinas funcionales

Aproximadamente el 1 % de la población mundial padece enfermedad celíaca causada por el gluten del trigo (Kang et al., 2013). Hasta el momento, la eliminación estricta del gluten de la dieta constituye la única medida preventiva efectiva (Gonçalves et al., 2016).

Ante esta problemática, diversos estudios han explorado el uso de harinas no derivadas del trigo para la formulación de productos alternativos. Fatoumata et al. (2016) desarrollaron productos utilizando maíz y sorgo enriquecidos con soya y moringa, observando variaciones importantes en las propiedades fisicoquímicas y funcionales.

Loucif et al. (2021) demostraron que la harina de cebada mejora las propiedades proximales y de cocción del cuscús cuando se combina con sémola de trigo. Asimismo, Timatey et al. (2021) reportaron que las propiedades físicas y funcionales del cuscús de caupí se modifican significativamente según la tecnología empleada.

El uso de harinas compuestas contribuye a mejorar las propiedades organolépticas y texturales de los productos alimenticios (Fatoumata et al., 2016), además de incrementar sus beneficios nutricionales.

4.4.1. Desarrollo de snacks y productos funcionales

Los consumidores muestran una alta aceptación por productos horneados debido a su versatilidad como alimentos básicos y snacks. En los últimos años, el desarrollo de productos con funciones de fortalecimiento nutricional e ingredientes innovadores ha cobrado gran relevancia (Shuang et al., 2024). La adición de *Pleurotus* en polvo (10 % p/p) no afecta negativamente los procesos fermentativos en productos panificados. Cirilincione (2022) reportó diferencias en la altura, la pérdida de peso, la firmeza, el color y la estructura de panes enriquecidos con harina de hongo. La mezcla de harinas constituye una estrategia clave para mejorar el perfil nutricional de los alimentos procesados. El amaranto (*Amaranthus caudatus*) destaca por su alto contenido de proteínas, fibra dietética y aminoácidos esenciales (Olawoye et al., 2021). Asimismo, la torta de soya (*Glycine max*) constituye una fuente importante de proteína e isoflavonoides con beneficios potenciales para la salud (Jeong et al., 2021; Oluwajuyitan et al., 2021).

El chalote (*Allium ascalonicum*) también presenta interés alimentario por su riqueza en compuestos fenólicos, flavonoides y antioxidantes (Shahrajabian et al., 2021). La incorporación de estos ingredientes en snacks extruidos sigue siendo un área de investigación emergente. Omoba et al. (2024) señalan que el desarrollo de productos elaborados a partir de fuentes no convencionales puede mejorar significativamente la composición nutricional de los alimentos y aportar beneficios para el control glucémico y la salud metabólica.



Figura 4. Snacks funcionales

4.5. Propiedades nutricionales de la harina de *Pleurotus djamor*

4.5.1. Cinética de secado y conservación de nutrientes

Según Zahoor et al. (2025), el secado a 75 °C representa un punto de equilibrio térmico adecuado para los hongos del género *Pleurotus*, ya que permite eliminar el agua libre y prevenir el crecimiento microbiano sin afectar significativamente las proteínas y los compuestos antioxidantes. Sánchez-Martín et al. (2025) demostraron que un periodo de secado de 24 horas permite obtener una harina fina con una adecuada capacidad de mezcla junto con la harina de maíz.

4.5.2. Biodisponibilidad de nutrientes y quitina

Las paredes celulares de los hongos están compuestas principalmente por quitina, un biopolímero resistente a la digestión humana. Zhang et al. (2020) señalan que los polisacáridos fúngicos requieren tratamientos térmicos o procesos de extracción para mejorar su disponibilidad.

Zahoor et al. (2025) indican que el secado controlado debilita parcialmente la red de quitina, facilitando la liberación de proteínas y antioxidantes.

La mezcla de harina de maíz con harina de *Pleurotus djamor* genera una combinación funcional importante. Martín et al. (2025) reportan que proporciones entre 15 y 25 % de harina

de hongo mejoran la textura y capacidad de absorción de snacks horneados a 160 °C, sin necesidad de incorporar grasas trans.

La combinación de harina de maíz y harina de hongo responde a una estrategia de complementación proteica. Mientras el maíz es deficiente en lisina, *Pleurotus djamor* aporta concentraciones importantes de este aminoácido esencial (Dai et al., 2025). La integración de ambos ingredientes mejora el valor biológico de la proteína total y genera un perfil aminoacídico más equilibrado.

4.5.3. Propiedades nutrimentales

El cultivo de hongos del género *Pleurotus* sobre residuos orgánicos contribuye al aprovechamiento de biomasa agrícola y a la obtención de nutrientes de alta calidad. Según Sosa-Martínez et al. (2023), la transformación biológica realizada por estos hongos permite convertir fibras complejas en aminoácidos esenciales y compuestos de interés nutricional.

Las harinas de *Pleurotus djamor* destacan por su contenido de proteínas, fibra, β -glucanos, zinc y selenio (Zahoor et al., 2025).

Además del valor nutricional, los hongos del género *Pleurotus* contienen compuestos antioxidantes y antiinflamatorios. Zhang et al. (2020) señalan que los β -glucanos y polisacáridos presentes en estos hongos podrían contribuir al fortalecimiento del sistema inmunológico y a la salud intestinal.

No obstante, aunque existen estudios prometedores, varios de estos efectos continúan en investigación y no deben considerarse equivalentes a propiedades terapéuticas comprobadas en humanos.

Martín et al. (2025) analizaron la capacidad antioxidante de las harinas de hongo rosa, observando que sus compuestos fenólicos contribuyen a reducir la oxidación lipídica en productos elaborados con maíz. Esto puede favorecer una mayor estabilidad oxidativa y disminuir la necesidad de conservadores artificiales.

4.6. Propiedades sensoriales y aceptación del consumidor

Las propiedades sensoriales constituyen un factor clave en el desarrollo de nuevos alimentos. *Pleurotus djamor* destaca por su color rosado, aroma característico y sabor umami similar al de algunos mariscos. De acuerdo con Zahoor et al. (2025), la incorporación de harina de hongo rosa en snacks elaborados con maíz permite obtener productos con textura crujiente, sabor agradable y un buen nivel de aceptación entre consumidores jóvenes. La presencia natural de glutamato y nucleótidos en el micelio fúngico intensifica el sabor umami del producto, lo que permite desarrollar snacks con características sensoriales competitivas frente a productos comerciales convencionales.



Figura 5. Productos horneados con harinas funcionales.

5. Metodología

5.1. Recolección de sustratos

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron cuatro residuos agroindustriales con potencial lignocelulósico: olote de maíz, zacate de maíz, paja de avena e hijuelos de agave (*A. angustifolia*), los cuales fueron utilizados como sustratos para el cultivo de *Pleurotus djamor*. La selección de estos materiales se realizó debido a su disponibilidad regional y a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos fundamentales para el crecimiento y desarrollo del micelio. El procesamiento de cada sustrato se realizó de acuerdo con sus características físicas. En el caso del agave (*A. angustifolia*), se utilizaron hijuelos provenientes de la planta,

los cuales fueron sometidos a secado a temperatura ambiente hasta reducir su contenido de humedad. Posteriormente, el material seco fue triturado en una picadora para obtener fragmentos de 3 a 5 cm de longitud. Para la obtención del sustrato de olote, se esperó la cosecha del maíz y, una vez retirados los granos, ronse recolectados y picaron en fragmentos de aproximadamente 2 a 4 cm. En cuanto a la paja de avena y el zacate de maíz, ambos materiales fueron cosechados y sometidos a secado a temperatura ambiente. Después del secado, los residuos fueron triturados para reducir su tamaño a partículas de entre 2 y 5 cm aproximadamente, favoreciendo así una mejor compactación y colonización del micelio en el sustrato.



Figura 6. Etapa de recolección de sustratos

5.2. Caracterización bromatológica

El contenido de humedad se determinó a partir de la pérdida de peso del material tras secarlo a 105 °C durante 24 horas o hasta alcanzar un peso constante. El contenido de humedad se calcula como la diferencia entre el peso inicial y el final, expresada como porcentaje del peso inicial. El contenido de proteínas se determinó midiendo el nitrógeno total (Nt) mediante el método Kjeldahl, que implica digestión, destilación y titulación, utilizando un factor de 6,25. El contenido lipídico se determinó mediante extracción Soxhlet con hexano como disolvente

orgánico, y el contenido de grasa se midió gravimétricamente tras la destilación con disolvente. El contenido de fibra bruta se determinó mediante el método Fibrebag, basado en el AOAC 962.09; las muestras desgrasadas y secas se sometieron a hidrólisis alcalina con 250 mL de H_2SO_4 0,12 M a 94 °C durante 30 minutos, seguida de lavados con agua caliente. Posteriormente, se realizó una digestión básica con 250 mL de KOH 0,23 M durante 30 minutos, con lavados sucesivos con agua caliente hasta alcanzar la neutralidad. El residuo se secó a 105 °C durante 4 horas y luego se calcinó a 600 °C durante 6 horas. El contenido de ceniza se determinó incinerando las muestras de fibra en un horno de alta temperatura y los carbohidratos fueron determinados por diferencia.

5.3. Preparación e inoculación del sustrato con *Pleurotus djamor*

Durante el proceso de siembra, se inoculó el micelio de *Pleurotus djamor* en los sustratos previamente preparados y acondicionados. Para ello, se colocaron 100 g de sustrato en sacos de tul, que posteriormente fueron sometidos a pasteurización en caliente a 95 °C durante 30 minutos. Este proceso se realizó en un recipiente de acero inoxidable, ajustado manualmente y equipado con un sistema de sellado hermético, utilizando una bolsa plástica como cubierta para mantener las condiciones de temperatura y presión durante el tratamiento térmico. Finalizado el proceso, los sacos fueron retirados y enfriados a temperatura ambiente para facilitar su escurrimiento y evitar un exceso de humedad antes de la inoculación. Posteriormente, se procedió a sanitizar el área de trabajo con el fin de reducir los riesgos de contaminación microbiológica. Sobre la mesa de trabajo se dispusieron los materiales necesarios para la siembra, entre ellos: una solución de alcohol al 70 % en atomizador, el micelio de *Pleurotus djamor*, bolsas de plástico, ligas o bandas elásticas para el sellado, un cuchillo pequeño y un rotulador permanente para la identificación de las muestras. Asimismo, se utilizó equipo de bioseguridad básico, conformado por cofia, mascarilla, guantes y bata de laboratorio, con el fin

de minimizar las posibles fuentes de contaminación externa durante la manipulación del sustrato y del micelio. Una vez acondicionada el área, se procedió a la inoculación, tomando cada saco con sustrato y distribuyendo pequeñas porciones del micelio de manera uniforme a lo largo del material. Este procedimiento se repitió hasta completar el contenido total del saco, procurando favorecer una adecuada colonización micelial y una mejor absorción de nutrientes por el hongo. Posteriormente, se perforaron aleatoriamente distintos puntos de la superficie de cada bolsa para permitir el intercambio gaseoso y la ventilación durante el proceso de incubación. La parte superior de cada bolsa fue asegurada con una banda elástica para evitar la entrada de contaminantes. Finalmente, se rotularon las muestras indicando la fecha de siembra, el tipo de sustrato y el tipo de micelio utilizado. Las bolsas inoculadas fueron colocadas en cajas de plástico cubiertas con película plástica, formando una cámara de incubación que permitió mantener las condiciones adecuadas para el desarrollo y la colonización del micelio de *Pleurotus djamor*.



Figura 7. Preparación e inoculación del sustrato.

5.4. Proceso de producción

Transcurridos aproximadamente 25 días después de la siembra, se observó la aparición de los primeros primordios de *Pleurotus djamor*, indicando el inicio de la etapa de fructificación. A

partir de este momento, se implementó un sistema de riego semiautomático con la finalidad de mantener las condiciones de humedad necesarias para el adecuado desarrollo de los cuerpos fructíferos. El sistema de riego estuvo conformado por dos boquillas pulverizadoras de 3 mm conectadas a un temporizador automático. Dicho sistema se alimentó mediante una manguera equipada con un filtro y conectada a un depósito de agua, permitiendo un suministro continuo y controlado. La frecuencia de riego programada fue de un minuto cada dos horas, favoreciendo la conservación de la humedad ambiental dentro de la cámara de incubación y evitando el desecamiento de los primordios. Durante esta etapa se realizó un monitoreo diario de los cuerpos fructíferos para evaluar su crecimiento y desarrollo. Asimismo, cada tres días se registró el peso de las muestras con el objetivo de analizar el comportamiento productivo de cada sustrato y determinar su capacidad de aprovechamiento por parte del hongo. La cosecha se llevó a cabo cuando los cuerpos fructíferos alcanzaron un desarrollo adecuado. Para el corte, cada hongo fue sujetado cuidadosamente desde el tallo y girado manualmente hasta desprenderlo completamente de la bolsa, procurando evitar daños al micelio y favorecer posteriores fructificaciones.

5.5. Obtención de la harina de *Pleurotus djamor*

Una vez alcanzada la maduración de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus djamor*, se procedió a la cosecha manual de las muestras para su posterior procesamiento postcosecha. Esta etapa tuvo como finalidad conservar las propiedades nutricionales del hongo y obtener una harina con características adecuadas para su incorporación en la formulación de snacks. El procesamiento postcosecha se dividió en dos etapas principales: deshidratación y molienda.

PRODUCCIÓN: RIEGO Y COSECHA DE CUERPO FRUCTÍFERO



Figura 8. Etapa de producción

5.5.1. Deshidratación

Los cuerpos frutíferos frescos fueron sometidos a un proceso de deshidratación con aire caliente en un deshidratador de acero inoxidable modelo ST-06. El secado se realizó a una temperatura constante de 75 °C durante 24 horas. Este rango de temperatura se considera adecuado para reducir la actividad del agua del producto y prolongar su vida útil, sin comprometer significativamente la estabilidad de las proteínas, los minerales y los compuestos bioactivos presentes en el hongo (Sarmiento, s.f.). Asimismo, el proceso de deshidratación permitió reducir el contenido de humedad del cuerpo frutífero, lo que favoreció su conservación y su posterior transformación en harina.

5.5.2. Molienda y tamizado

Posteriormente, el material deshidratado fue procesado en un molino de martillos marca DANGER con el propósito de reducir el tamaño de partícula y obtener una harina fina y

uniforme. Después de la molienda, la harina fue sometida a un proceso de tamizado para homogeneizar el tamaño de partícula y eliminar fragmentos de mayor tamaño. El producto final presentó una textura fina y homogénea, adecuada para facilitar su mezcla con harina de maíz en las etapas posteriores de formulación del snack. La reducción uniforme del tamaño de partícula resulta fundamental para mejorar las propiedades de mezcla, textura y estabilidad del producto final, lo que permite una mejor integración de la harina de *Pleurotus djamor* con otros ingredientes durante el procesamiento alimentario.



Figura 9. Elaboración de la harina de *Pleurotus djamor*

5.6. Formulación y cocción

Finalmente, se procedió a la formulación de los snacks, se mezcló harina de maíz comercial con harina de *P. djamor* en concentraciones del 10%, 15%, 20% y 25% (Tabla 1).

Tabla 1. Formulación de snack funcional de harina de maíz y *Pleurotus djamor*

Tratamiento	Harina de maíz (%)	Harina de <i>Pleurotus djamor</i> (%)
T1	100	-
T2	90	10
T3	85	25
T4	80	20
T5	75	25

A esta masa se le incorporó agua y se moldeó mediante un extrusor. El snack fue colocado en bandejas de aluminio y sometido a un proceso de horneado estandarizado a 160 °C durante 11 minutos. Se establecieron temperaturas y tiempos fijos para garantizar la textura crujiente del producto final, sin la adición de grasas trans ni de conservantes sintéticos.



Figura 10. Elaboración del Snack haciendo diferentes formulaciones

5.7. Análisis sensorial del snack tipo churrito

Con el propósito de evaluar la aceptabilidad del snack tipo “churrito” elaborado con harinas de *Pleurotus djamor* y de maíz, se realizó un análisis sensorial con panelistas no entrenados. La evaluación sensorial se realizó con la participación de 60 panelistas no entrenados, seleccionados aleatoriamente entre estudiantes y personal universitario. Previo a la evaluación, a cada participante se le explicó el procedimiento de análisis y las características que debían considerar durante la degustación. Se evaluaron diferentes formulaciones de snacks elaboradas con distintas proporciones de harinas de maíz y de *Pleurotus djamor*. Las muestras fueron codificadas para evitar sesgos durante la evaluación y se presentaron en recipientes individuales en condiciones higiénicas adecuadas. A cada panelista se le proporcionó agua potable para neutralizar el paladar entre muestras. Los atributos evaluados fueron color, aroma, sabor, textura y retrogusto, debido a que estos parámetros permiten determinar el nivel de aceptación sensorial del producto por parte del consumidor. La evaluación se realizó mediante

una escala hedónica estructurada de cinco puntos, en la que los valores más altos indicaron una mayor aceptación del atributo evaluado.

6. Resultados y discusión

La producción de setas utilizando diferentes sustratos lignocelulósicos representa un proceso laborioso que requiere monitoreo y control constante de variables ambientales como temperatura, humedad, ventilación y luz. Debido a ello, el presente proyecto se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), específicamente en el Departamento de Fitomejoramiento, donde fue posible mantener condiciones adecuadas para el crecimiento y fructificación de *Pleurotus djamor*.

6.1. Caracterización bromatológica del cuerpo fructífero de *Pleurotus djamor*

En la figura 11 se observa que la fracción de materia seca y la humedad constituyen la base principal para determinar la estabilidad del snack. Los resultados arrojan que los hongos cultivados en paja de avena disponen de una estructura óptima para la conservación, ya que esta registra un 94% de materia seca. Lo que significa que solo el 6% de su peso es agua, lo que garantiza un riesgo mínimo de degradación enzimática antes del procesamiento. Por otro lado, los hongos cultivados en el olote de maíz y el zacate muestran niveles de humedad sutilmente superiores (cerca al 9,5%); esto explica por qué el micelio trabajó arduamente en estos medios para colonizar la biomasa. Los cuerpos fructíferos de *P. djamor* en agave, por su parte, se mantuvo en un punto intermedio con un 93% de materia seca, lo cual aporta una densidad de sólidos que beneficia la consistencia final del producto.

Al analizar el perfil de lípidos y grasas, el snack resultante se convierte en un logro nutricional. La muestra también refleja que el índice graso en todos los casos es menor al 1%, para el caso de la avena alcanzó el nivel más bajo registrado (0.63%). Este dato es decisivo, esto posiciona al snack como un alimento "libre de grasas trans" y de muy bajo aporte de calorías provenientes de grasas. Esta particularidad se debe al aprovechamiento que efectúa el hongo

utilizando los pocos lípidos del sustrato en la formación de sus membranas celulares, esto deja un residuo rico en nutrientes y a la vez magro.

El análisis de minerales (cenizas) evidencia un proceso de acumulación de sustancias. El hongo extrajo minerales esenciales, como el zinc, el selenio y el potasio, a partir de los rastrojos. Tras la cosecha, tanto en el agave como en el olote, la concentración de minerales dejó un sustrato gastado y enriquecido. Esto muestra que el hongo actúa como un perfeccionador biológico, ya que concentra en el snack los micronutrientes que estaban disueltos en el residuo agrícola crudo.

Finalmente, la proteína y la fibra definen el valor funcional. El valor nutricional del snack se debe a la mezcla de harinas de hongo y de maíz. La harina de maíz, por sí sola, carece de ciertos nutrientes y, al complementarse con la harina de hongo, aporta lisina. Esta combinación se convierte en una proteína completa y fácil de asimilar por el organismo. El procesamiento térmico a 75 °C para el secado y a 160 °C para el horneado es decisivo, ya que estas temperaturas rompen la compleja red de quitina, transformando un material rígido en una estructura crujiente en la que los aminoácidos y los carbohidratos resultan finalmente biodisponibles para el sistema digestivo humano. Este análisis confirma que, independientemente del sustrato, la biotransformación con *Pleurotus djamor* eleva un residuo agrícola a la categoría de superalimento, con la avena como la mejor opción por rendimiento y el Agave/Zacate como alternativas valiosas por su aporte mineral y rapidez de respuesta. El hongo *P. djamor* revaloriza los residuos al absorber sus micronutrientes (Vega et al., 2022). Además, mezclar harina de maíz con la del hongo crea una proteína completa al aportar lisina. Este enriquecimiento es clave para crear alimentos funcionales conforme a estándares modernos de nutrición (Zahoor et al., 2025).

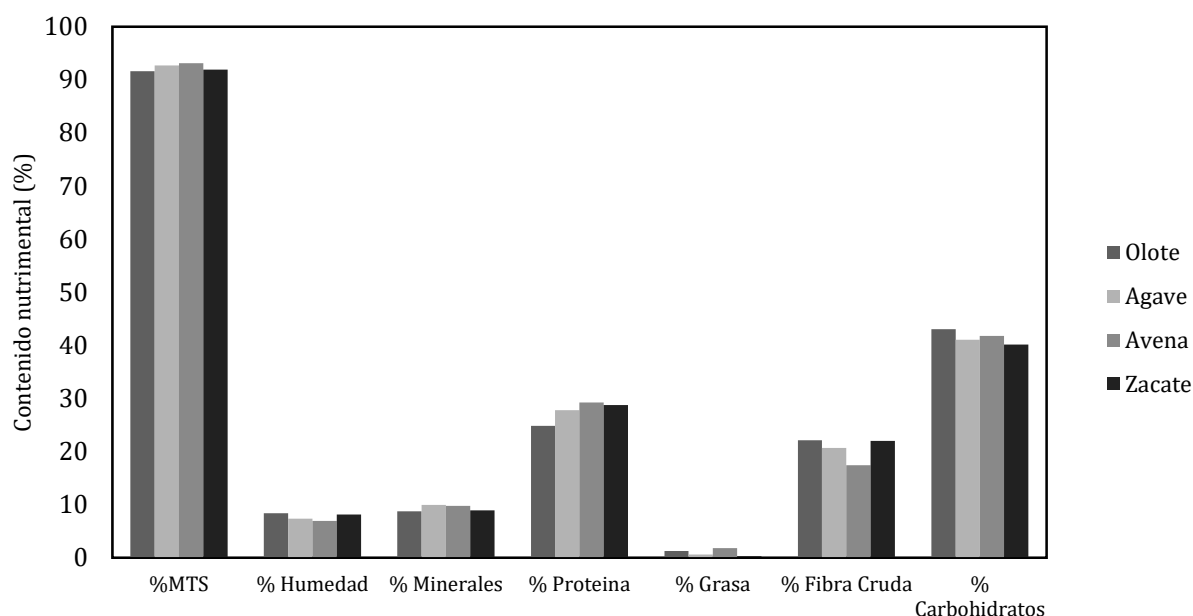


Figura 11. Caracterización fisicoquímica del cuerpo fructífero *Pleurotus djamor* cultivado en diferentes residuos

6.2. Cinética de producción de setas de *Pleurotus djamor*

La producción de *Pleurotus djamor* fue monitoreada durante un periodo aproximado de 70 días. Durante este tiempo se realizaron evaluaciones periódicas cada tercer día, registrando el peso de las muestras con el propósito de analizar la cinética de producción y el comportamiento de cada sustrato durante el desarrollo del cultivo. Los sustratos evaluados fueron agave, avena, olote, zacate de maíz y un tratamiento testigo. Durante el periodo experimental se observó la interacción entre el micelio y cada uno de los sustratos, que comenzó con la fase de colonización micelial y, posteriormente, con la formación de los primeros cuerpos fructíferos. Asimismo, debido a la naturaleza productiva del hongo, algunas muestras presentaron hasta dos etapas de cosecha. En la Figura 12 se observa que, durante el primer mes, todos los tratamientos atravesaron una etapa inicial de adaptación y colonización micelial. Posteriormente, el hongo inició la transición hacia la formación de cuerpos fructíferos, proceso que estuvo acompañado de una disminución del peso del sustrato debido al aprovechamiento de nutrientes y a la degradación de la biomasa lignocelulósica. La reducción de peso continuó hasta la etapa de fructificación y la primera cosecha, momento en

el que las muestras alcanzaron sus valores mínimos de biomasa residual. Sin embargo, el tratamiento elaborado con olote presentó un comportamiento distinto al de los demás sustratos, al registrar un incremento en la producción de biomasa. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza estructural del olote, ya que fue el único tratamiento que presentó un incremento de peso observable a partir del día 32 y que, al finalizar el experimento, registró un aumento cercano al 50 % respecto a la biomasa inicial. Esto podría indicar una dinámica diferente de retención de humedad o una colonización micelial más lenta en comparación con los demás sustratos.

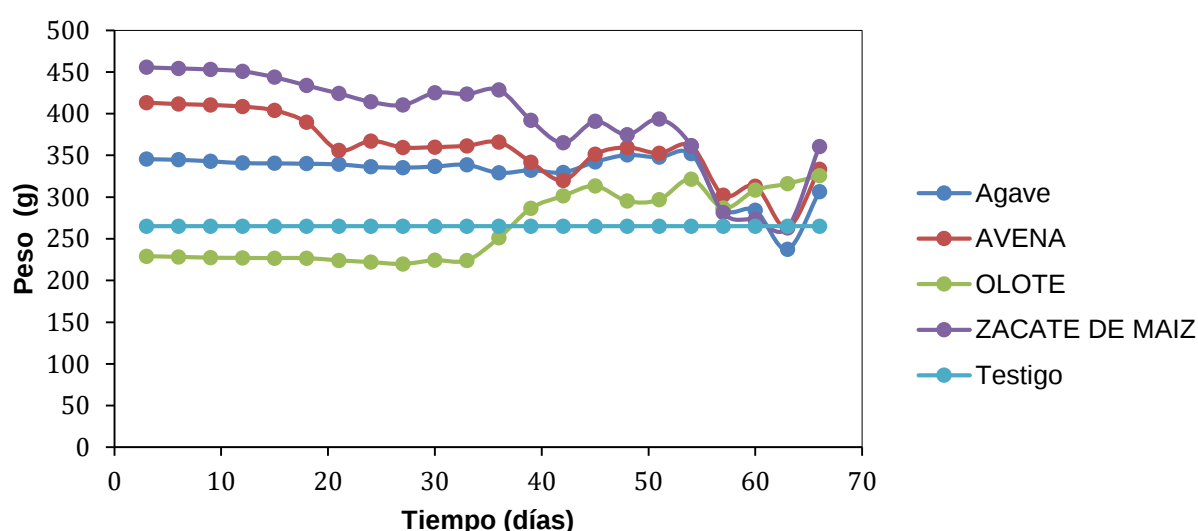


Figura 12. Cinética de producción de *Pleurotus djamor*

6.3. Eficiencia biológica, rendimiento y tasa de producción

Con el propósito de determinar el desempeño productivo de los distintos sustratos, se evaluaron parámetros como la eficiencia biológica (%EB), la tasa de producción (%TP) y el rendimiento (%R), que permitieron identificar el potencial de cada matriz lignocelulósica para la producción de *Pleurotus djamor*. Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias importantes entre los tratamientos, lo que indica que la composición y las características físicas del sustrato influyen directamente en el aprovechamiento de nutrientes, la velocidad de colonización y la producción final de biomasa fúngica.

Tabla 2. Análisis de hongos cultivados en diferentes sustratos

Muestras	EB (%)	TP (%)	R (%)
Avena	126.88	1.92	11.49
Zacate de maíz	95.31	1.44	9.54
Olote	33.02	0.50	2.96
Agave	23.82	0.36	2.49

6.4. Caracterización bromatológica de los sustratos antes y después del cultivo

de *Pleurotus djamor*

Los resultados muestran modificaciones importantes en la composición química de los sustratos tras el cultivo, lo que evidencia el aprovechamiento metabólico de los compuestos lignocelulósicos por el hongo. En términos generales, se observó una disminución en el contenido de carbohidratos y de materia seca, mientras que la proteína, la fibra y los minerales aumentaron en la mayoría de los tratamientos.

6.4.1. Materia seca total y humedad

La materia seca total (%MST) presentó ligeras disminuciones tras el cultivo en todos los sustratos evaluados. Antes del proceso, los valores oscilaron entre 91.22 % y 94.20 %, mientras que en los sustratos gastados se registraron entre 90.22 % y 91.66 %. Esta reducción puede atribuirse al consumo de compuestos orgánicos estructurales, principalmente celulosa y hemicelulosa, que el micelio utiliza como fuente de energía durante su crecimiento y fructificación. Por otra parte, el porcentaje de humedad aumentó en todos los tratamientos tras el cultivo. Este comportamiento se relaciona con la capacidad del sustrato degradado para retener agua, así como con la actividad metabólica del micelio durante el proceso de colonización.

Tabla 3. Determinación de materia seca total y humedad de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% MST Inicial	% MST Final	% Humedad Inicial	% Humedad Final
Olote	92.30	91.66	7.70	8.33
Agave	93.20	90.22	6.58	9.78
Avena	94.20	91.04	5.80	8.96
Zacate	91.22	90.32	8.78	9.68

El agave presentó el mayor incremento de humedad, pasando de 6.58 % a 9.78 %, mientras que el olote mostró los cambios menos pronunciados.

6.4.2. Contenido de minerales

El contenido de minerales (Tabla 3) mostró cambios significativos tras el cultivo. El agave presentó el mayor incremento, pasando del 10.53 % al 20.56 %, seguido por avena y zacate. Este comportamiento puede explicarse porque, al degradarse parte de los compuestos orgánicos del sustrato, los minerales tienden a concentrarse de forma proporcional en el material residual. El olote fue el único tratamiento que presentó una disminución de minerales, lo que podría indicar una menor capacidad de retención de minerales o una mayor movilización de estos compuestos durante el crecimiento del hongo. Los altos valores de ceniza observados en los sustratos gastados sugieren que estos materiales aún conservan valor nutricional y podrían reutilizarse posteriormente como abono orgánico o complemento para alimentación animal.

Tabla 3. Determinación de minerales de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% Minerales Inicial	% Minerales Final
Olote	4.43	1.58
Agave	10.53	20.56
Avena	6.68	14.10
Zacate	8.87	11.53

6.4.3. Contenido de proteína

El contenido de proteína aumentó en la mayoría de los tratamientos después del cultivo, lo cual se relaciona directamente con el crecimiento del micelio dentro del sustrato. Durante el desarrollo de *Pleurotus djamor*, el micelio aporta proteínas estructurales y enzimas extracelulares que incrementan el contenido proteico del material residual. El agave presentó el mayor incremento en proteína, pasando de 8.38 % a 12.98 %, lo cual coincide con su elevada eficiencia de degradación y de aprovechamiento nutricional observada durante el cultivo. La avena mantuvo valores relativamente estables, mientras que el olote mostró una ligera disminución, posiblemente debido a una menor colonización micelial. Desde el punto de vista nutricional, estos resultados indican que los sustratos gastados aún conservan un contenido proteico considerable, lo que incrementa su potencial de reutilización.

Tabla 4. Determinación de proteínas de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% Proteína Inicial	% Proteína Final
Olote	3.44	3.14
Agave	8.38	12.98
Avena	9.65	9.68
Zacate	4.95	6.56

6.4.4. Contenido de lípidos

El contenido de grasa presentó variaciones moderadas entre los tratamientos tras el cultivo. Los incrementos observados en agave y olote podrían relacionarse con metabolitos producidos por el micelio durante el crecimiento fúngico. En contraste, la avena presentó una disminución, posiblemente debido al aprovechamiento de compuestos lipídicos por el hongo.

Tabla 5. Determinación de lípidos de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% Grasa Inicial	% Grasa Final
Olote	0.96	1.06
Agave	0.87	1.17
Avena	0.98	0.63
Zacate	0.91	0.94

6.4.5. Fibra cruda

La fibra cruda fue uno de los parámetros que presentó mayores incrementos después del cultivo. Este incremento puede explicarse porque el hongo consume preferentemente carbohidratos fácilmente degradables, lo que provoca una concentración relativa más alta de las fracciones fibrosas más resistentes. Además, el micelio aporta compuestos estructurales como la quitina y los β -glucanos, que forman parte de la fibra dietética. La avena presentó el mayor incremento de fibra cruda, alcanzando 33.80 %, lo que indica una transformación estructural importante del sustrato tras el crecimiento del hongo.

Tabla 5. Determinación de lípidos de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% Fibra Inicial	% Fibra Final
Olote	12.29	26.74
Agave	11.78	25.06
Avena	7.63	33.80
Zacate	17.86	23.45

6.4.6. Carbohidratos

Los carbohidratos disminuyeron significativamente en todos los tratamientos después del cultivo, confirmando que constituyeron la principal fuente energética utilizada por *Pleurotus djamor* durante la colonización y fructificación. El agave y la avena mostraron las mayores reducciones, lo que indica una degradación más eficiente de celulosa y hemicelulosa por parte

del hongo. En contraste, el zacate y el olote conservaron porcentajes más altos de carbohidratos residuales, lo que podría indicar una degradación menos intensa.

Tabla 6. Determinación de carbohidratos de los sustratos antes y después del cultivo de *Pleurotus djamor*

Sustrato	% Carbohidratos Inicial	% Carbohidratos Final
Olote	77.11	66.95
Agave	66.20	36.48
Avena	71.17	39.39
Zacate	66.65	55.48

Pleurotus djamor modifica significativamente la composición química de los residuos agrícolas empleados como sustrato. Durante el cultivo, el hongo consume carbohidratos estructurales y transforma parte de la biomasa lignocelulósica en proteína fúngica, compuestos fibrosos y biomasa micelial. El agave fue el sustrato que presentó el comportamiento más sobresaliente, debido a su incremento en proteínas y minerales, así como a la marcada reducción de carbohidratos, lo que sugiere una elevada eficiencia metabólica del hongo en este sustrato. La avena destacó por presentar el mayor contenido final de fibra cruda, mientras que el olote mostró una menor eficiencia de transformación nutricional. En conjunto, los resultados indican que los sustratos utilizados aún conservan un valor nutricional importante después del cultivo, por lo que podrían reutilizarse en procesos de compostaje, acondicionamiento de suelos o alimentación animal, fortaleciendo así el aprovechamiento integral de los residuos agroindustriales y el enfoque de economía circular.

6.5. Análisis sensorial

El hongo (*Pleurotus djamor*) se destaca por su color vibrante y un sabor distintivo muy similar al de los mariscos, una característica especial que permanece incluso después de secarlo a 75°C. Un paso crucial es la consolidación de la harina de hongo con la de maíz. Al moler el hongo deshidratado de manera muy fina, se logra una mezcla perfecta con el maíz, eliminando texturas fibrosas y creando una masa homogénea. Desde una perspectiva visual, esta unión

resulta sumamente atractiva: aunque el hongo es de color rosa en su forma primaria, su harina aporta tonos cálidos que, al hornearse a 160°C, se transforman en un dorado profundo y natural. Según Zahoor et al. (2025), esta mezcla no solo resulta altamente nutritiva debido a todos sus componentes, sino que también adquiere una textura crujiente con un aroma agradable. La combinación de estas dos harinas permite que el snack desarrolle una estructura interna con pequeños poros que facilitan su fractura al morderlo, logrando esa sensación tostada pero suave que es muy apreciada en los productos tipo snack (Figura 13).



Figura 13. Churitos con diferentes concentraciones de harinas

Además, al hornearse, el aroma dulce característico del maíz se mezcla con los sabores orgánicos del hongo, generando un aroma único y natural. La aceptación de este snack se ve aumentada por la presencia natural del sabor umami. Este sabor, que según Zahoor et al. (2025) proviene del propio hongo, funciona como potenciador del sabor natural de todos los ingredientes de la harina. Esto permite que el snack sea intenso y sabroso sin necesidad de un uso excesivo de sal ni de aditivos químicos. La integración de sabores y sensaciones que ofrece constituye, por sí misma, una alternativa saludable que resulta visualmente atractiva y deliciosa al paladar. Al ser un producto con menos del 1% de grasa, no deja sensación aceitosa en la boca y se percibe limpio y fresco. De esta forma, se logra un snack que no solo compite en términos de valor nutricional, sino que también destaca frente a productos comerciales tradicionales por su sabor auténtico y su calidad artesanal, siendo ideal para consumidores de todas las edades y géneros (Figura 14).

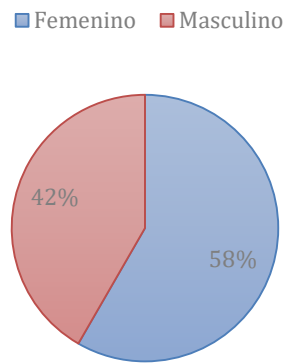


Figura 14. Aceptación general por género de panelistas

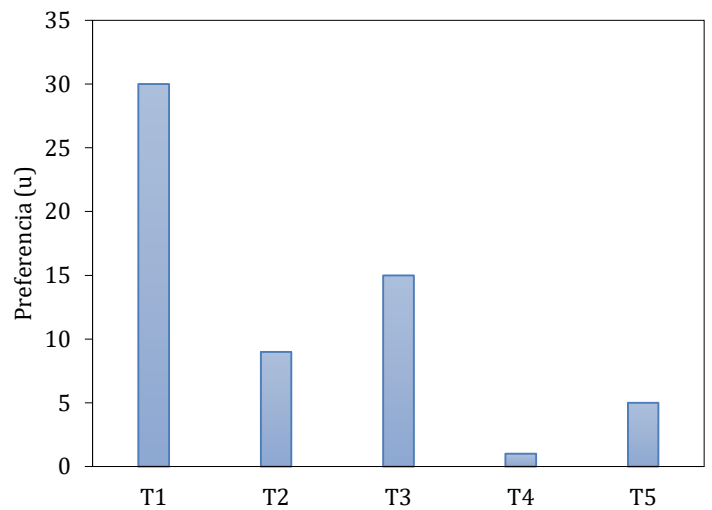


Figura 15. Preferencia por tratamiento

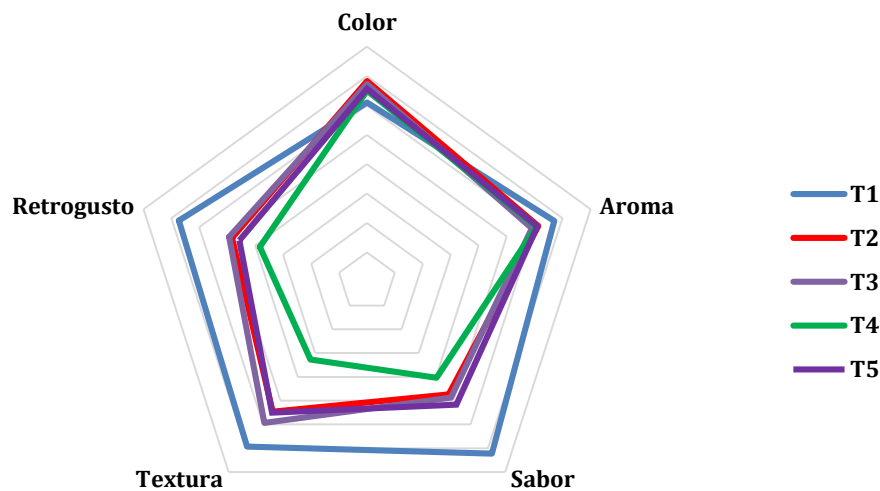


Figura 16. Escala de aceptabilidad

7. Conclusión

Los residuos agrícolas derivados del olote de maíz, zacate de maíz, paja de avena e hijuelos de agave (*A. angustifolia*) pueden ser utilizados como sustratos alternativos en la producción de *Pleurotus djamor*, promoviendo el aprovechamiento biotecnológico de materiales lignocelulósicos de bajo valor comercial. La capacidad del hongo para transformar estos residuos en biomasa comestible confirma el potencial de la biotransformación fúngica como estrategia de economía circular y aprovechamiento sustentable de subproductos

agroindustriales. Durante el proceso de producción, que duró aproximadamente 70 días, se obtuvieron cuerpos fructíferos sin contaminación por hongos filamentosos, lo que evidencia que las condiciones de inoculación, incubación y manejo implementadas permitieron desarrollar un proceso de producción inocuo y técnicamente viable. La evaluación cinética de producción permitió monitorizar el comportamiento de *Pleurotus djamor* en cada uno de los sustratos utilizados, observándose diferencias en la velocidad de colonización, la degradación del sustrato y la formación de cuerpos fructíferos. Entre los tratamientos evaluados, el sustrato de agave (*A. angustifolia*) mostró uno de los desempeños más sobresalientes, con una mayor reducción de carbohidratos y un incremento significativo en proteínas y minerales tras el cultivo, lo que sugiere una elevada capacidad de aprovechamiento metabólico por parte del hongo. Los análisis bromatológicos realizados antes y después del cultivo demostraron que *Pleurotus djamor* modifica significativamente la composición química de los sustratos. Se observó una disminución importante de carbohidratos estructurales, acompañada de incrementos en la proteína, la fibra y el contenido mineral en la mayoría de los tratamientos. Estos resultados evidencian la capacidad del hongo para transformar compuestos lignocelulósicos complejos en biomasa de mayor valor nutricional. Asimismo, se corroboró que la combinación de harinas de maíz y de *Pleurotus djamor* permite mejorar el perfil nutrimental del producto final mediante la complementación proteica. Mientras el maíz presenta deficiencia de lisina, la harina fúngica aporta aminoácidos esenciales que contribuyen a incrementar el valor biológico de la proteína total del snack. Además, el procesamiento térmico aplicado durante la elaboración favorece la disponibilidad de nutrientes al modificar parcialmente las estructuras complejas de la pared celular del hongo, como la quitina. La obtención de harina de *Pleurotus djamor* mediante deshidratación y molienda permitió desarrollar un ingrediente funcional con potencial de aplicación en productos alimenticios. La harina presentó características adecuadas de textura y tamaño de partícula para su

incorporación en mezclas con harina de maíz destinadas a la formulación de snacks. Se evaluó el efecto de la adición de harina de *Pleurotus djamor* en la elaboración de un snack tipo “churrito” mediante un análisis sensorial con 60 panelistas no entrenados. Se analizaron atributos como color, aroma, sabor, textura y retrogusto, y se determinó que la formulación con 85 % de harina de maíz y 15 % de harina de *Pleurotus djamor* presentó la mejor aceptación general en comparación con las demás formulaciones evaluadas. El snack desarrollado destacó por su aporte de proteína, fibra y minerales, además de presentar características sensoriales aceptables para el consumidor. El sabor umami natural aportado por el hongo contribuyó positivamente a la aceptación del producto y representa una alternativa para reducir el uso de aditivos artificiales en alimentos procesados. Finalmente, esta investigación demuestra que la integración del aprovechamiento de residuos agrícolas con la biotecnología fúngica puede contribuir al desarrollo de alimentos funcionales de bajo costo y mayor valor nutricional. Asimismo, el uso de residuos agroindustriales como materia prima representa una alternativa con potencial ambiental, económico y alimentario, particularmente en regiones rurales donde existe disponibilidad de biomasa lignocelulósica y se requieren estrategias sustentables para la producción de alimentos.

8. Bibliografía

- Angelescu, G. C., Vamanu, E., & Stefan, R. I. (2015). Productivity and biological efficiency of *Pleurotus eryngii* MMIV cultivation at laboratory level. *Journal of Agronomy*, 14(3), 185.
- Antunes, F., Marçal, S., Taofiq, O., MMB Morais, A., Freitas, A. C., CFR Ferreira, I., & Pintado, M. (2020). Valorization of mushroom by-products as a source of value-added compounds and potential applications. *Molecules*, 25(11), 2672.
- Bellettini, M. B. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*. https://www.researchgate.net/publication/312239479_Factors_affecting_mushroom_Pleurotus_spp/fulltext/587bb21108aed3826ae8d870/Factors-affecting-mushroom-Pleurotus-spp.pdf
- Cirlincione, F., Venturella, G., Gargano, M. L., Ferraro, V., Gaglio, R., Francesca, N., ... & Mirabile, G. (2022). Functional bread supplemented with *Pleurotus eryngii* powder: A potential new food for human health. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 27, 100449.
- Cohen, R., Persky, L., & Hadar, Y. (2002). Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. *Applied microbiology and biotechnology*, 58, 582-594.
- Dai, Y., et al. (2025). Alternative protein sources: Bioconversion of agricultural residues into fungal biomass for functional food design. *Journal of Food Engineering and Technology*.
- Diamantopoulou, P., Fourtaka, K., Melanouri, E. M., Dedousi, M., Diamantis, I., Gardeli, C., & Papanikolaou, S. (2023). Examining the impact of substrate composition on the biochemical properties and antioxidant activity of *Pleurotus* and *Agaricus* mushrooms. *Fermentation*, 9(7), 689.
- El-Enshasy, H. A., Selvamani, S., Dailin, D. J., Abd Malek, R., Hanapi, S. Z., Ambehatabi, K. K., & Moloi, N. (2018). Antioxidant compounds of the edible mushroom *Pleurotus ostreatus*. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 7, 1-14.
- Gaitán-Hernández, R., et al. (2006). Cultivo de hongos comestibles: *Pleurotus* spp. y *Lentinula edodes*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- Guzmán, G. 1983. Los hongos de la Península de Yucatán. II. Nuevas exploraciones y adiciones micológicas. *Biotica* 8: 71-100.

- Guo, J., Zhang, M., & Fang, Z. (2022). Valorization of mushroom by-products: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(13), 5593-5605.
- Hama-Ba, Fatoumata., Silga, P., & Diawara, B. (2016). Evaluation de la qualité et de l'acceptabilité de couscous à base de trois formulations de farines composites enrichies au soja (*Glycine max*) et au moringa (*Moringa oleifera*). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(6), 2497–2510. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.8>
- Kang, J.Y., Kang, A.H.Y., Green, A., Gwee, K.A. and Ho, K.Y. (2013), Systematic review: worldwide variation in the frequency of coeliac disease and changes over time. *Aliment Pharmacol Ther*, 38: 226-245. <https://doi.org/10.1111/apt.12373>
- Loucif Chemache, Farida Kehal , Hacène Namoune (2021). La aglomeración húmeda de harina de cebada-trigo sémola se mezcla en cuscús: Efectos sobre las propiedades reológicas, culinarias y sensoriales. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, 100412. <https://doi.org/> [DOI del artículo]
- Martín, A., et al. (2025). Exploiting the nutritional value of fungal-based snacks: Structural and sensorial stability of *Pleurotus djamor* formulations. *International Journal of Gastronomy and Food Science*.
- Megersa, S., & Tolessa, A. (2024). Enhancing yields of *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes* mushrooms using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solms) supplemented with locally available feedstock as substrate. *Heliyon*, 10(20).
- Milić, S. P., Stanojević, L., Rajković, M. K., Milić, M. S., Nikolić, V. V., Nikolić, L., & Veljković, B. V. (2013). Actividad antioxidante de los extractos de *Galium mollugo* L. obtenida mediante diferentes técnicas de recuperación. *Hemijska Industrija*, 67, 89–94. <https://doi.org/10.2298/HEMIND120314042M>
- Okuda, Y. (2022). Sustainability perspectives for future continuity of mushroom production: The bright and dark sides. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1026508.
- Oluwajuyitan, T. D., Ijarotimi, O. S., & Fagbemi, T. N. (2021). Plantain based dough meal: nutritional property, antioxidant activity and dyslipidemia ameliorating potential in high-fat induced rats. *Clinical Phytoscience*, 7(1), 92.
- Oyetayo, F. L., Akindahunsi, A. A., & Oyetayo, V. O. (2007). Chemical profile and amino acids composition of edible mushrooms *Pleurotus sajor-caju*. *Nutrition and Health*, 18(4), 383-389.

Portilla Segura, Alejandro, Romero-Arenas, Omar, Valencia de Ita, María de los Ángeles, Hernández Espinosa, Miguel Ángel, Lanteta Cortés, Gerardo, & Rivera-Tapia, José Antonio. (2019). Determinación de los parámetros de productividad de cepas de *Pleurotus ostreatus* y *P. opuntiae* cultivadas en paja de trigo y pencas de maguey combinadas con sustratos agrícolas. *Scientia fungorum*, 49, e1216. Epub 23 de abril de 2021. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1216>

Royse, D. J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current overview of mushroom production in the world. *Edible and medicinal mushrooms: technology and applications*, 5-13.

Saldarriaga, J. (s.f.). Degradación de materiales lignocelulósicos por hongos del género *Pleurotus*: Una revisión técnica. Repositorio Académico.

Sarmiento, L. (s.f.). Efecto del secado térmico en la retención de compuestos bioactivos en setas comestibles. Documento Técnico de Investigación.

Shuang Wang., Bai, H., Wang, Z., Peng, L., Li, L., Yan, H., Zhu, L., Wang, Y., Shao, J., & Liu, J. (2024). Characterization of newly isolated *Bacillus cereus* D3 co-producing α -amylase and protease and its application in food raw materials. *Food Bioscience*, 62, 105255. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105255>

Silva, A. D. M., Sousa, J., Hultberg, M., Figueiredo, S. A., Freitas, O. M., & Delerue-Matos, C. (2022). Fluoxetine Removal from Aqueous Solutions Using a Lignocellulosic Substrate Colonized by the White-Rot Fungus *Pleurotus ostreatus*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2672. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052672>

Sosa-Martínez, J., et al. (2023). Biotransformación de residuos lignocelulósicos de agave y maíz mediante el cultivo de *Pleurotus djamor*: Un enfoque de economía circular. *Revista Iberoamericana de Micología*.

Taofiq, O., Calhelha, R. C., Heleno, S., Barros, L., Martins, A., Santos-Buelga, C., ... & Ferreira, I. C. (2015). The contribution of phenolic acids to the anti-inflammatory activity of mushrooms: Screening in phenolic extracts, individual parent molecules and synthesized glucuronated and methylated derivatives. *Food Research International*, 76, 821-827.

Teniente-Martínez, G., et al. (2022). Caracterización de sustratos emergentes y cinética de colonización de micelio en rastrojo de avena y maíz. *Boletín de Biotecnología Aplicada*.

- Thiago Gonçalves dos Santos Martins., Costa, A. L., Oyamada, M. K., Schor, P., & Sipahi, A. M. (2016). Ophthalmologic manifestations of celiac disease. *International journal of ophthalmology*, 9(1), 159–162. <https://doi.org/10.18240/ijo.2016.01.26>
- Timitey, Aboubacar, Adinsi, Laurent, Madodé, Yann Eméric, Cissé, Fatimata, Akissoé, Noël, & Hounhouigan, Djidjoho Joseph. (2021). Pratiques de production et caractéristiques physiques et chimiques du shô basi, un couscous de niébé (*Vigna unguiculata*) produit au Mali. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 21(2), 17509–17528. <https://doi.org/10.18697/ajfand.97.19475>
- Vega, R., et al. (2022). Asimilación de pentosas y degradación de hemicelulosa en etapas tempranas de incubación de hongos ostra. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*.
- Velázquez-De Lucio, et al. (2022). Evaluación de residuos de Agave tequilana como sustrato para la producción de *Pleurotus djamor*. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*.
- Zahoor, I., et al. (2025). Nutritional and sensory attributes of mushroom-enriched snacks: Impact of drying kinetics and thermal processing at 75°C. *Food Chemistry: X*.
- Zhang, L., et al. (2020). Hepatoprotective effects of polysaccharides from *Pleurotus DJ amor*: Antioxidant activity and cellular restoration. *Journal of Functional Foods*.