



Agricultural waste from the puebla highlands as substrates for the cultivation of lion's mane mushroom (*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.) †

[Residuos agrícolas del altiplano poblano como sustratos para el cultivo del hongo melena de león (*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.)]

A. Barajas-Montiel¹, R. I. Pérez-López¹, Ma. A. Valencia-de Ita¹,
C. Parraguirre-Lezama¹, O. Romero-Arenas^{1*}, A. Rivera²
and A. Romero-López³

¹Centro de Agroecología, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio VAL 1, Km 1.7, Carretera a San Baltazar Tetela, San Pedro Zacachimalpa, Puebla 72960, México. andrea.barajasmontiel.icuap@viep.com.mx; mavi1179@outlook.es; conrado.parraguirre@correo.buap.mx; biol.ora@hotmail.com*

²Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Puebla 72570, México. jart70@yahoo.com

³Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas", Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio VAL 2, Km 1.7, Carretera a San Baltazar Tetela, San Pedro Zacachimalpa, Puebla 72960, México. anabelrl@ifuap.buap.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The use of agricultural waste is a key strategy to strengthen the sustainable production of edible and medicinal mushrooms, by allowing its valorization in the reduction of production costs. In agricultural regions such as the Altiplano Poblano, there is a wide availability of lignocellulosic waste with the potential to be used as alternative substrates. **Objective.** To evaluate the productive performance of the mushroom *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers., using agricultural waste from the Altiplano Poblano as substrates for its cultivation. **Methodology.** Corn cobs and stubble, wheatgrass, pine sawdust, ocoxal (pine needle litter, *Pinus* spp.), and a balanced lignocellulosic mixture were used as substrates. The productive parameters mycelial colonization rate, biological efficiency, and production rate were evaluated in order to compare the mushroom's performance on each of the substrates tested. **Results.** Corn cobs and the control group showed the highest biological efficiency (64.72 y 63.58 %) and an average production rate of 11.32 and 12.64 g day⁻¹ respectively, which is attributed to their adequate porosity and carbon/nitrogen ratio. In contrast, corn stover and ocoxal showed low yields, while pine sawdust and wheatgrass registered the lowest productive performance. **Implications.** The results demonstrate the viability of using regional agricultural residues as alternative substrates, contributing to waste reduction, efficient use of local resources, and strengthening the circular economy in agricultural production systems. **Conclusions.** Of the agricultural residues, corn stover shows high potential for the cultivation of *H. erinaceus*, allowing for improved productive performance of the fungus and promoting sustainable production practices based on the valorization of agricultural byproducts. **Key words:** Medicinal mushrooms; agricultural waste; lignocellulosic substrates; biological efficiency.

RESUMEN

Antecedentes. El aprovechamiento de residuos agrícolas constituye una estrategia clave para fortalecer la producción sustentable de hongos comestibles y medicinales. En regiones agrícolas como el Altiplano Poblano, existe una alta

† Submitted January 17, 2026 – Accepted July 7, 2026. <https://doi.org/10.56369/tsaes.6789>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = A. Barajas-Montiel: <http://orcid.org/0009-0006-8450-8400>; R. I. Pérez-López: <http://orcid.org/0000-0003-4094-5503>; Ma. A. Valencia-de Ita: <http://orcid.org/0000-0003-1229-3552>; C. Parraguirre-Lezama: <http://orcid.org/0000-0002-8510-5877>; O. Romero-Arenas: <http://orcid.org/0000-0003-0076-3609>; A. Rivera: <http://orcid.org/0000-0002-2727-4584>; A. Romero-López: <http://orcid.org/0000-0002-9886-1305>

disponibilidad de residuos lignocelulósicos con potencial para ser utilizados alternativamente como sustratos para la producción de hongos. **Objetivo.** Evaluar la productividad del hongo *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers., sobre residuos agrícolas del Altiplano Poblano. **Metodología.** Se emplearon como sustratos olote y rastrojo de maíz, zacate de trigo, aserrín de pino, “ocoxal” (acículas secas de pino, *Pinus* spp.) y una mezcla lignocelulósica balanceada. Se evaluaron los parámetros productivos de tasa de desarrollo y velocidad de crecimiento, eficiencia biológica y tasa de producción, con el fin de comparar el rendimiento en fresco de cada uno de los sustratos evaluados. **Resultados.** El olote de maíz y el grupo control presentaron los valores más altos de eficiencia biológica (64.72 y 63.58 %) y una tasa de producción promedio de 11.32 y 12.64 g día⁻¹ respectivamente, lo cual se atribuye a su adecuada relación carbono/nitrógeno. En contraste, el rastrojo de maíz y el ocoxal mostraron rendimientos bajos, mientras que el aserrín de pino y el zacate de trigo registraron el menor desempeño productivo. **Implicaciones.** Los resultados del presente estudio evidencian el potencial de la utilización de residuos agrícolas regionales como sustratos para hongos, lo que contribuye a la reducción de desechos, al aprovechamiento eficiente de recursos locales y al fortalecimiento de la economía circular en sistemas agro-productivos. **Conclusiones.** De los residuos agrícolas, el rastrojo de maíz presenta un alto potencial para el cultivo de *H. erinaceus*, permitiendo mejorar el desempeño productivo del hongo promoviendo prácticas de producción sustentable basadas en la valorización de subproductos agrícolas.

Palabras clave: Hongos medicinales; residuos agrícolas; sustratos lignocelulósicos; eficiencia biológica.

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI enfrenta el doble desafío de satisfacer la creciente demanda alimentaria de una población proyectada en 9.7 mil millones para 2050 y gestionar eficientemente los residuos agrícolas generados anualmente (Lackner y Besharati, 2025). En México, esta problemática es relevante por la producción de aproximadamente 45 millones de toneladas anuales de residuos agrícolas, de las cuales 25.5 millones corresponden a rastrojo de maíz (SIAP-SAGARPA, 2022). En el Altiplano Poblano, comunidades como Ocotepéc, Pizarro y Chichicauhtla generan en total más de 2,500 toneladas de rastrojos de maíz, cebada, avena y trigo (SIAP, 2024). Esta biomasa disponible representa una oportunidad para explorar alternativas de valorización sustentable con beneficios productivos, económicos y ambientales.

México es un país megadiverso en hongos comestibles, ocupando el segundo lugar mundial con 371 especies silvestres utilizadas en la dieta tradicional (Bautista-Nava, 2007; Garibay-Orijel y Ruan-Soto, 2014). La producción comercial de hongos comestibles en México tiene una trayectoria documentada desde comienzos de la década de 1990, cuando Martínez-Carrera *et al.* (1991) realizaron una de las primeras estimaciones sistemáticas, reportando una producción anual aproximada de 47,468 toneladas, en el contexto del desarrollo inicial de la industria del champiñón en el país. No obstante, el crecimiento del sector se remonta a décadas previas, consolidándose particularmente entre finales del siglo XX, con un incremento de 25.4% en la producción entre 1986 y 1997, periodo en el que México se posicionó como el principal productor de hongos comestibles en Latinoamérica, aportando alrededor del 80.8% de la producción total (Martínez-Carrera *et al.*, 2007; Martínez-Guerrero *et al.*, 2012). Actualmente, la producción es dominada por el cultivo de champiñón

(95.3%), lo que genera más de 200 millones de dólares y alrededor de 25,000 empleos (Romero-Arenas *et al.*, 2019).

La participación del sector público y académico ha posicionado a México como el único país latinoamericano con una sólida red de investigación en el cultivo y mejoramiento tecnológico de hongos comestibles (Martínez-Carrera *et al.* 2000). En este contexto, es fundamental valorizar estos alimentos considerados como medicinales, tal es el caso del hongo melena de león (*H. erinaceus*) altamente consumido en China, país que actualmente lidera su producción a nivel mundial como un alimento con propiedades funcionales y medicinales (Han y Xu, 2026). Esto se atribuye principalmente a la presencia de compuestos fenólicos con efectos protectores frente al daño oxidativo y la inflamación crónica (Li *et al.*, 2021), así como a otros compuestos bioactivos, como los β -glucanos, que presentan propiedades inmunomoduladoras, antitumorales y antioxidantes. Asimismo, destacan metabolitos como las hericenonas y las erinacinas, los cuales promueven la síntesis del factor de crecimiento nervioso, contribuyendo a los procesos de regeneración neuronal (Szućko-Kociuba *et al.*, 2023).

La integración de producción de hongos en sistemas agroecológicos promueve la diversificación productiva, un componente clave para la resiliencia frente a crisis climáticas y económicas (Altieri, 1999). La valorización sustentable de los subproductos agrícolas permite transformar residuos en insumos aprovechables, lo cual fortalece economías rurales, fomenta la autosuficiencia local y promueve la innovación social (Camargo y Williams, 2012). El cultivo de *H. erinaceus* sobre sustratos lignocelulósicos destaca como una alternativa viable para la diversificación productiva con bajo requerimiento tecnológico, contribuyendo a la

soberanía alimentaria (Miles y Chang, 2004; Royse *et al.*, 2017).

Por lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial de los residuos agrícolas generados en municipios del Altiplano Poblano, principalmente Ocotepéc y Tepeyahualco, para determinar la viabilidad agronómica de *H. erinaceus* y proponer alternativas sustentables orientados al manejo de subproductos agrícolas de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de sustratos

Para la evaluación de producción *H. erinaceus*, se seleccionaron los residuos agrícolas con mayor disponibilidad y aquellos provenientes de los cultivos

con mayor producción en las comunidades rurales de Ocotepéc, Pizarro (Juan Sarabia Pizarro) y Chichicuaútl, localizadas en el Altiplano Poblano (Figura 1). Los sustratos incluyeron rastrojo de maíz (*Zea mays* L.), olote de maíz (*Zea mays* L.), zacate de trigo (*Triticum aestivum* L.), “Ocoxal” (acículas secas de pino, *Pinus* spp.) y aserrín de pino (*Pinus* spp.). Además, se empleó un grupo control, el cual consistió en una mezcla de residuos: 50% aserrín de encino, 30% zacate de trigo y 20% olote de maíz molido debido a la eficiencia probada de estos componentes (Jahedi *et al.*, 2024). Esta combinación se seleccionó por su potencial para aportar una fuente balanceada de carbono estructural y nitrógeno, favoreciendo el desarrollo micelial de *H. erinaceus*, en concordancia con estudios que reportan el uso de mezclas de aserrín y residuos agrícolas como sustratos para *H. erinaceus* (Atila, 2019).

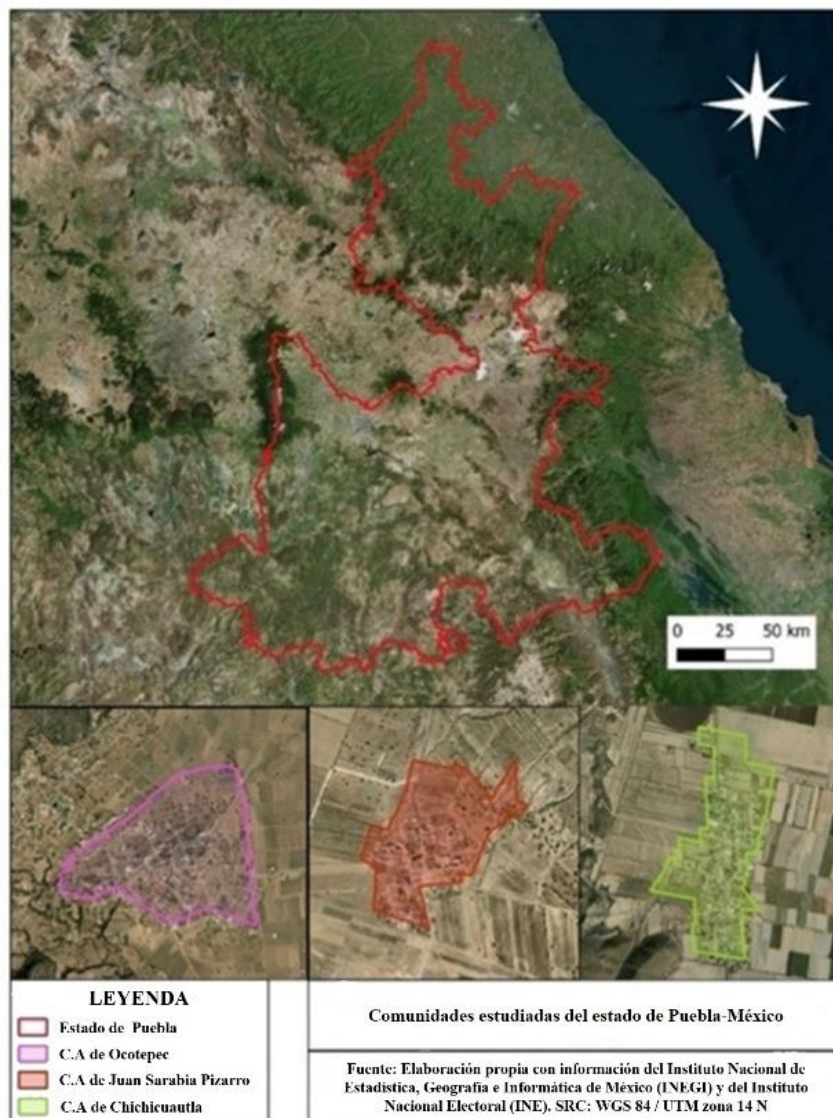


Figura 1. Comunidades estudiadas del estado de Puebla, México.

Los residuos fueron triturados a fragmentos de 2-3 cm para la evaluación de su composición química, que incluyó humedad (AOAC 934.01), cenizas totales (AOAC 942.05) y materia orgánica (AOAC 967.05), siguiendo la normativa AOAC (2016). El contenido de carbono total (%C) y nitrógeno total (%N) se estimó a partir de la materia orgánica (MO), de acuerdo con las fórmulas propuestas por Nelson y Sommers (1982), donde $\%C = MO \times 0.50$ y $\%N = \%C / (C/N)$. La relación C/N se calculó considerando los valores estimados de carbono y nitrógeno de cada sustrato, con el fin de evaluar su influencia sobre el crecimiento micelial y la productividad del cultivo.

Aislamiento de la cepa nativa de *H. erinaceus*

Se aisló una cepa nativa denominada MA-He1 de *H. erinaceus* a partir del basidiocarpo recolectado en las inmediaciones del cerro La Malinche (19°12'12.4"N, 97°59'52.3"W) durante la temporada de lluvias de agosto a septiembre de 2024. El aislamiento se realizó mediante técnicas microbiológicas convencionales, obteniéndose cultivos puros en medio sólido de agar papa dextrosa (PDA) (Mata y Salmones, 2021).

Para su propagación, se tomaron fragmentos de micelio de aproximadamente 5 mm de diámetro provenientes de cultivos con 10 días de crecimiento, los cuales se inocularon en cajas Petri con medio PDA e incubados en condiciones de oscuridad a 28 °C durante 10 días. La cepa MA-He1 se encuentra resguardada en el Laboratorio de Hongos Comestibles y Fitopatología 204 del Centro de Agroecología del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

La identificación molecular se llevó a cabo mediante la amplificación y secuenciación de la región ITS (Internal Transcribed Spacer) del ADN ribosomal, que comprende los marcadores ITS1, 5.8S e ITS2 (Amezcuza *et al.*, 2026). Las secuencias obtenidas fueron sometidas a un proceso de edición manual en BioEdit, con el propósito de depurar las lecturas y eliminar regiones ambiguas o de baja calidad. Posteriormente, se realizó la alineación de las secuencias mediante el algoritmo BLASTn en la base de datos del NCBI, lo cual permitió identificar secuencias homólogas cercanas y seleccionar taxones de referencia representativos. Estas secuencias de referencia fueron utilizadas para la reconstrucción filogenética mediante inferencia bayesiana, considerando la región ITS completa.

El análisis filogenético se ejecutó en MrBayes v3.2.6 bajo un modelo de sustitución nucleotídica previamente determinado. Se implementaron cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) con un total de

1,000,000 generaciones, verificando la convergencia y estabilidad de los parámetros estimados. Los valores de probabilidad posterior obtenidos en cada nodo se utilizaron como medida de soporte estadístico para inferir las relaciones filogenéticas entre los taxones analizados.

Determinación de velocidad de crecimiento y tasa de desarrollo

Para evaluar la velocidad de crecimiento micelial, los residuos seleccionados se trituraron a fragmentos de 2–3 cm y se colocaron en placas Petri de 100 × 20 mm. Posteriormente, fueron esterilizados a 121 °C durante 60 minutos para la eliminación de contaminantes microbianos y el fomento de condiciones óptimas para el desarrollo del hongo, así mismo, el pH se ajustó a 6.0 ± 0.2 , mediante la adición de solución de NaOH a 1N (Imtiaj *et al.*, 2008). Se inocularon fragmentos de la cepa nativa MA-He1 de *H. erinaceus* de 5 mm de diámetro con 10 días de edad en las placas, que fueron incubadas en oscuridad a 28 °C durante 10 días. El diámetro micelial se midió cada 12 horas mediante un vernier digital (CD-6 Mitutoyo). La velocidad de crecimiento ($\text{cm} \cdot \text{día}$) se calculó mediante la ecuación lineal de crecimiento $y = mx + b$, donde “y” representa la distancia micelial, “m” la pendiente, “x” el tiempo y “b” la constante (Romero-Arenas *et al.*, 2010). Asimismo, se calculó la tasa de desarrollo diario (mm) siguiendo el procedimiento descrito por Muñoz-Castillo (2020), mediante los radios de crecimiento inicial (C_i) y final (C_f) de la colonia y el tiempo transcurrido ($T_f - T_i$).

Preparación de inóculo

El inóculo se preparó utilizando semilla de trigo (*T. aestivum*). Se hirvieron 500 g de trigo durante 20 minutos en 5 L de agua, dejando reposar 30 minutos y escurridos en recipiente plástico de 10 kg por 60 minutos. Se añadieron 5 g de cal y 20 g de yeso y se homogeneizó la mezcla. El trigo (500 g) se colocó en frascos de 700 g y se esterilizó a 121 °C durante 60 minutos. Una vez enfriados, los frascos se inocularon con 0.25 cm² de agar colonizado con la cepa MA-Ee1 bajo flujo laminar (VECCO, México) y se incubaron a temperatura ambiente durante 25 días, siguiendo el protocolo descrito por Romero-Arenas *et al.* (2010).

Inoculación en unidades de producción

Para la inoculación en las unidades de producción, los residuos agrícolas fueron previamente triturados mecánicamente en fragmentos de aproximadamente 2–3 cm de longitud utilizando una picadora de forraje (Modelo 1800), con el fin de homogenizar el tamaño de partícula y facilitar su manejo. Posteriormente, los

sustratos fueron esterilizados a 121 °C durante 60 minutos y, una vez enfriados, la inoculación se llevó a cabo bajo condiciones asépticas en campana de flujo laminar (Portilla-Segura *et al.*, 2019). Se prepararon bolsas plásticas con filtro marca ®Sojourner (20 × 13 × 50 cm) con 6 kg de sustrato húmedo, inoculadas con inóculo en proporción 1:10. Las unidades se incubaron a temperatura ambiente (26 ± 2 °C) hasta colonización completa. Al observarse primordios, las bolsas se trasladaron al cuarto de fructificación, manteniendo humedad relativa de 70–80 %, temperatura de 26–28 °C, luz indirecta diurna y extracción de aire por 60 minutos cada 8 horas, según Lu *et al.* (2025). Se determinó la eficiencia biológica (EB %) y la tasa de producción (TP %) de acuerdo con Salmones *et al.* (2020). La eficiencia biológica se calculó mediante la relación entre el peso seco inicial del sustrato y el peso total de hongos frescos obtenidos, expresada en porcentaje. A su vez, la tasa de producción se obtuvo dividiendo la EB (%) entre el tiempo transcurrido desde la inoculación hasta el primer corte, también expresada en porcentaje. El experimento se realizó bajo un diseño experimental de bloques al azar con seis tratamientos y 30 repeticiones por tratamiento por duplicado. Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ($p < 0.05$) para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Todos los análisis fueron realizados con la paquetería R Studio (R Core Team, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características fisicoquímicas de residuos agrícolas del Altiplano Poblano

En cuanto a las características fisicoquímicas de los diferentes residuos lignocelulósicos evaluados como sustratos potenciales para el cultivo de *H. erinaceus*, se observa variabilidad considerable en humedad, cenizas, materia orgánica y contenidos estimados de carbono (% C) y nitrógeno (% N), factores determinantes para el crecimiento micelial y la fructificación (Tabla. 1). Estas diferencias reflejan la diversidad estructural de los materiales agrícolas que influyen directamente en la eficiencia biológica del cultivo (Miles y Chang, 2004).

El pH de los sustratos evaluados mostró un gradiente entre condiciones ligeramente ácidas y cercanas a la neutralidad, con valores que oscilaron entre 4.8 y 6.7. Los sustratos más ácidos correspondieron al aserrín de pino (4.8), mientras que materiales como el zacate de trigo y algunos residuos agrícolas presentaron valores más elevados (6.1–6.7), por su parte, el grupo control se ubicó en 6.2 cercano al rango óptimo para el crecimiento micelial (Imtiaj *et al.*, 2008). Esta

variabilidad es relevante, ya que *H. erinaceus* se desarrolla preferentemente en condiciones ligeramente ácidas, con un óptimo cercano a pH 6.0. En este sentido, los valores registrados en los sustratos evaluados coinciden con lo reportado en la literatura, donde se indica que un pH moderadamente ácido favorece la colonización del micelio y reduce el riesgo de condiciones adversas para su desarrollo (Atila, 2019).

El aserrín de pino y el ocoxal presentaron altos contenidos de materia orgánica (91.85 % y 90.32 %) y relaciones C/N elevadas (200:1 y 120:1), lo que indica abundancia de carbono estructural proveniente de lignina y celulosa, componentes clave para especies ligninolíticas como *H. erinaceus*, que dependen de fuentes ricas en carbono para su metabolismo oxidativo (Ko *et al.*, 2005). Sin embargo, el bajo contenido de nitrógeno (0.23–0.34 %) puede restringir la biosíntesis de proteínas y enzimas hidrolíticas, disminuyendo la colonización del sustrato por el micelio (Hřebečková *et al.*, 2024). Por ello, la suplementación con materiales ricos en nitrógeno, como salvado de trigo, soya o estiércol compostado, resulta necesaria para equilibrar la relación C/N y optimizar el desarrollo micelial (Atila, 2018).

En contraste, el olote y el rastrojo de maíz exhibieron relaciones C/N intermedias (88:1 y 80:1) y contenidos de humedad adecuados (43–71 %), condiciones que favorecen simultáneamente la aireación y la retención hídrica del sustrato. Estas propiedades son particularmente favorables para *H. erinaceus* (Ofosu *et al.*, 2016). Adicionalmente, su mayor disponibilidad relativa de nitrógeno promueve la síntesis de enzimas lignocelulolíticas, como lacasas y peroxidasas, que permiten una degradación eficiente de la pared vegetal (Chutimanukul *et al.*, 2023). Dado que estos residuos son abundantes, accesibles y ampliamente distribuidos en sistemas agrícolas tradicionales, su uso constituye una alternativa sustentable para la producción de hongos comestibles en contextos rurales.

Por otra parte, el zacate de trigo denota una relación C/N baja (25.70:1) y un contenido de nitrógeno elevado (1.50 %), factores que estimulan el rápido crecimiento micelial, pero que también pueden favorecer el desarrollo de microorganismos competidores y generar contaminaciones bacterianas si no se controla estrictamente la humedad y el pH del sustrato (Ko *et al.*, 2005; Figlas *et al.*, 2007). En consecuencia, se recomienda emplear el zacate de trigo en mezclas con sustratos de alta relación C/N, como aserrín u olote de maíz, con el fin de alcanzar un balance nutricional más estable y reducir el riesgo de contaminación.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de residuos agrícolas y restos vegetales utilizados para elaboración de sustrato para *H. erinaceus*.

Sustratos	Humedad Total	Ceniza Total	Materia orgánica Total (%)	C	N	Relación C/N	pH
Aserrín pino	57.094	8.15	91.85	45.93	0.23	200:1	4.8
Ocoxal	90.556	9.68	90.32	40.64	0.34	120:1	5.0
Olote de maíz	42.913	9.85	90.15	41.47	0.47	88.20:1	6.1
Rastrojo de maíz	70.665	9.88	90.12	38.75	0.48	80:1	6.7
Zacate de trigo	67.917	8.28	91.72	38.52	1.50	25.70:1	6.5
* Grupo control	45.40	9.08	95.46	47.30	0.38	90:1	6.2

*El grupo control contiene: 50 % aserrín de encino, 30 % zacate de trigo y 20 % de olote de maíz. El contenido de carbono (% C) y nitrógeno (% N) se estimó a partir de la materia orgánica (MO) mediante las fórmulas propuestas por Nelson y Sommers (1982), donde $\% C = MO \times 0.50$ y $\% N = \% C / (C/N)$. La relación C/N se calculó considerando los valores aproximados de carbono y nitrógeno totales de cada sustrato con la fórmula $C/N = (\% N) / (\% C)$.

El sustrato control, integrado por 50 % de aserrín de encino, 30 % de zacate de trigo y 20 % de olote de maíz, presentó propiedades fisicoquímicas particularmente adecuadas para el cultivo de hongos comestibles. La elevada proporción de componentes lignocelulósicos favorece una estructura porosa y estable, mientras que la relación C/N cercana a 90:1 proporciona un entorno propicio para especies con alta capacidad de degradación de compuestos estructurales, promoviendo una colonización eficiente (Miles y Chang, 2004). En conjunto, los resultados indican que sustratos con relaciones C/N entre 80 y 100, alto contenido de materia orgánica y adecuada retención de humedad como el olote y rastrojo de maíz, así como, el grupo control son los más adecuados para el cultivo de *H. erinaceus*, además de ser materiales localmente disponibles que fortalecen esquemas de producción sustentable y de economía circular basados en la valorización de residuos agroindustriales (Wendiro *et al.*, 2019). Esta tendencia concuerda con hallazgos reportados por Chutimanukul *et al.* (2023) donde demostraron que sustratos con proporciones óptimas de carbono y nitrógeno, como el aserrín de caucho (100 %) y la mezcla de aserrín de caucho con bambú en relación 3:1, permiten mantener rendimientos favorables.

Identificación de la cepa MA He1

El análisis de la secuencia de la región ITS de la cepa MA He1 permitió obtener una alineación de alta calidad, la cual fue comparada con secuencias de taxones de referencia depositadas en bases de datos públicas (Figura 2). La reconstrucción filogenética mediante inferencia bayesiana mostró que la cepa MA

He1 se agrupa dentro del clado correspondiente a *H. erinaceus*, formando un clúster monofilético con secuencias de referencia previamente reportadas para esta especie. Este agrupamiento presentó valores de soporte altamente robustos (probabilidad posterior, PP ≥ 0.99), lo que confirma la identidad molecular de la cepa MA He1. Los parámetros del análisis bayesiano evidenciaron una adecuada convergencia entre las cadenas, con una desviación estándar promedio de las frecuencias de partición de 0.016061 y un valor máximo de 0.056418. Asimismo, el factor de reducción potencial de escala (PSRF) mostró valores cercanos a la unidad (promedio = 1.043; máximo = 1.104), indicando estabilidad en la estimación de los parámetros y confiabilidad en la topología inferida. El registro correspondiente se encuentra disponible en GenBank bajo el número de acceso PX687867.

Tasa de desarrollo y velocidad de crecimiento micelial

Los resultados del presente estudio indican que la tasa de desarrollo (TD) y la velocidad de crecimiento (VC) del micelio de *H. erinaceus* están fuertemente influenciadas por factores como el equilibrio carbono/nitrógeno (C/N), la estructura física del sustrato y su capacidad de retención de humedad. Entre los sustratos evaluados (Figura 3 y 4), el grupo control (50 % aserrín de encino, 30 % zacate de trigo y 20 % olote de maíz) presentó el mejor desempeño (TD = 42.43 mm; VC = 4.32 mm/día), seguido del olote de maíz, con valores similares (TD = 40.00 mm; VC = 4.20 mm/día).

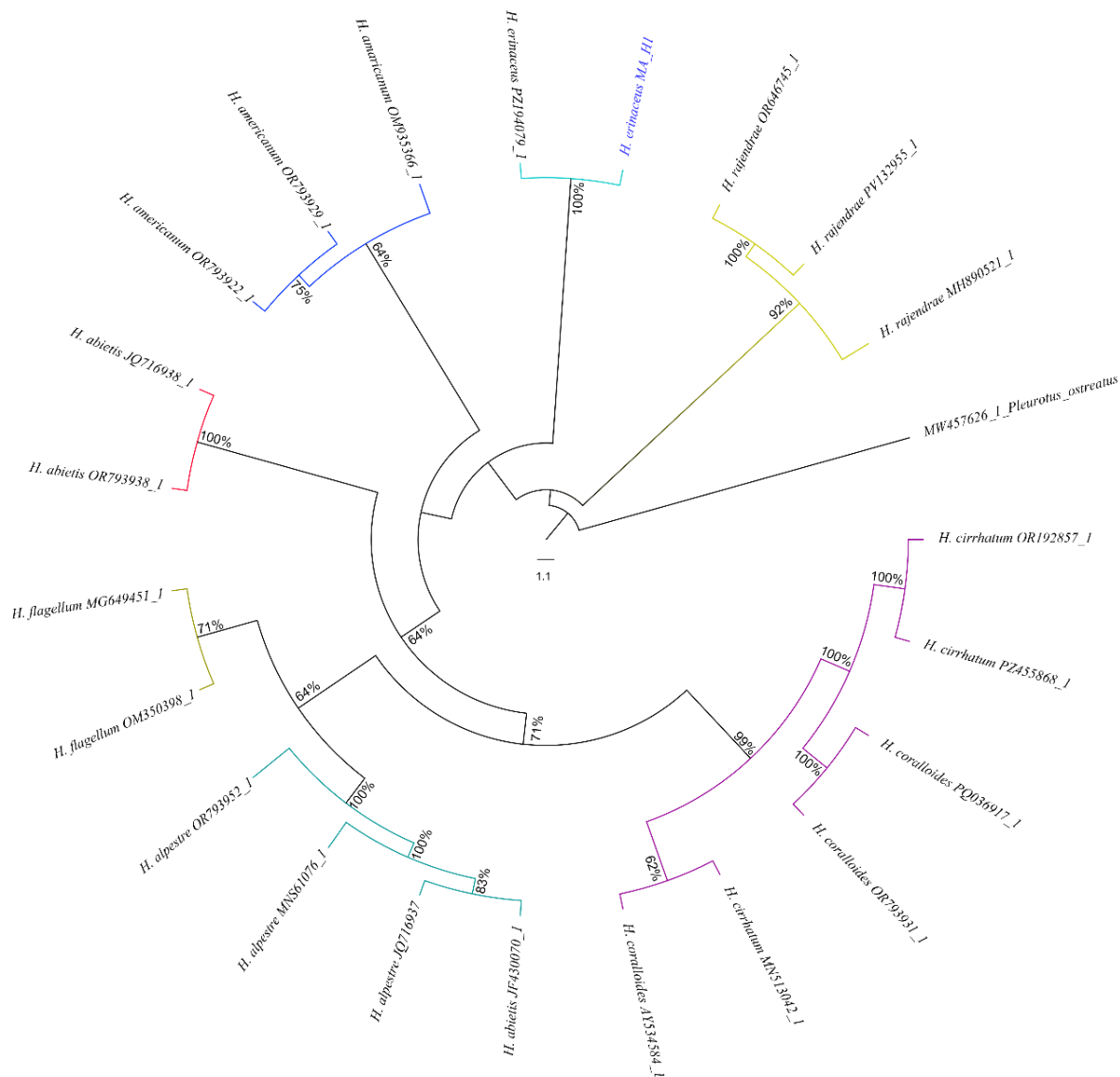


Figura 2. Árbol filogenético obtenido mediante inferencia bayesiana basado en secuencias de la región ITS del ADN ribosomal de *H. erinaceus* y especies relacionadas. El análisis se llevó a cabo bajo el modelo evolutivo GTR + I + G, utilizando cadenas MCMC y un descarte del 25 % inicial como *burn-in*. El árbol fue enraizado utilizando un taxón externo (*Pleurotus ostreatus*: MW457626.1) para establecer la polaridad de las relaciones filogenéticas.

El ocoxal (TD = 39.12 mm; VC = 3.80 mm/día) y el rastrojo de maíz (TD = 36.74 mm; VC = 3.69 mm/día) presentaron valores intermedios, lo que sugiere su potencial como componentes secundarios en formulaciones de sustratos mixtos. En contraste, el

aserrín de pino mostró un crecimiento limitado (TD = 27.41 mm; VC = 2.83 mm/día), lo cual se asocia a su elevada relación C/N (200:1) y a la presencia de compuestos fenólicos y resinas con efectos inhibitorios (Tornberg *et al.*, 2003).

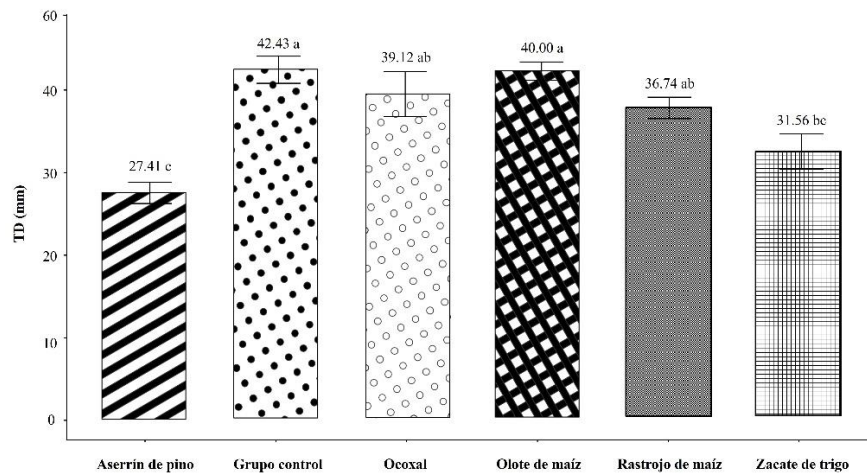


Figura 3. Tasa de desarrollo (TD) del micelio de *Hericium erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

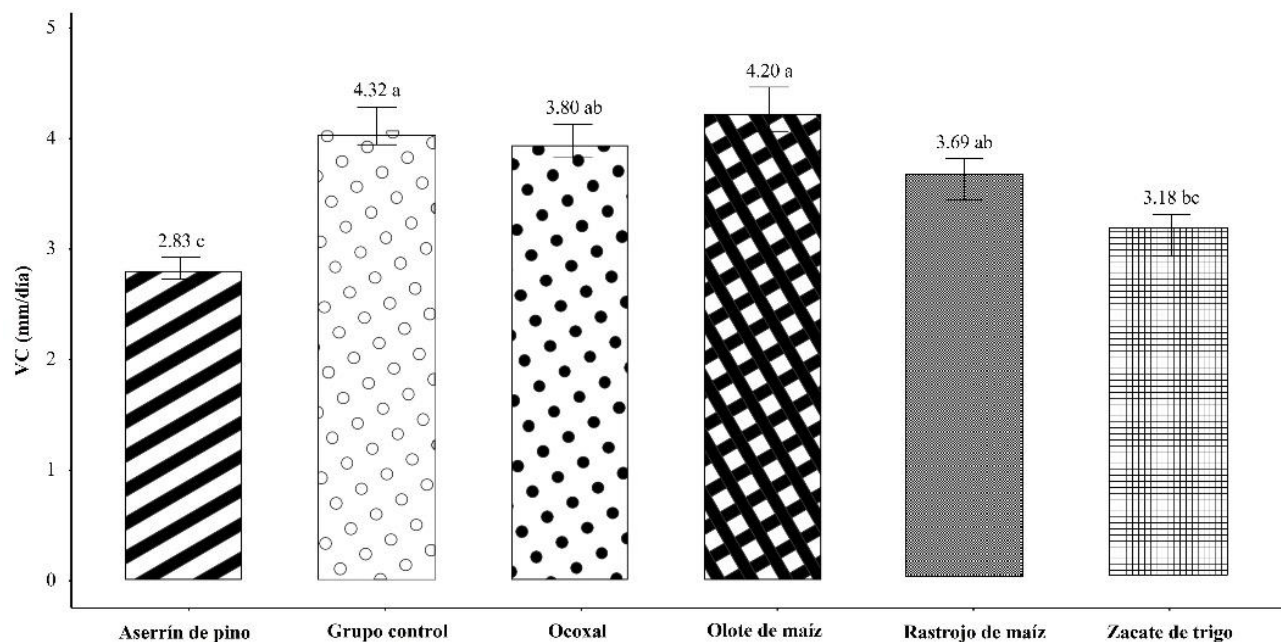


Figura 4. Velocidad de crecimiento (VC) del crecimiento de *Hericium erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Por otro lado, el zacate de trigo, a pesar de su contenido relativamente alto de nitrógeno (1.5 %), presentó colonización irregular debido a problemas de compactación y baja aireación (Chutimanukul *et al.*, 2023). En comparación con lo reportado para la seta de ostra, *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) P. Kumm., especie que tolera amplias relaciones C/N y presenta elevada capacidad celulolítica y hemicelulolítica (Miles y Chang, 2004; Hoa *et al.*, 2015). *H. erinaceus* presenta un crecimiento más lento y selectivo, requiriendo sustratos balanceados y con adecuada estructura física (Hřebečková *et al.*, 2024). En este

sentido, la relación C/N desempeña un papel clave tanto en el crecimiento micelial como en la formación de cuerpos fructíferos.

Diversos estudios han sugerido valores óptimos para este parámetro: Balakrishnan y Nair (1995) propusieron una relación C:N de 50:1 para diferentes sustratos, mientras que Atila *et al.* (2017) encontraron que las mezclas con proporciones C:N entre 51.7 y 82.7 favorecían el crecimiento micelial de *H. americanum*, siendo la formulación 80S:2CSH (80 % de paja de avena y 20 % de cáscara de semilla de

algodón) la que presentó el mejor desempeño. Estos valores se alinean con los observados en el presente estudio, donde los sustratos con relaciones C/N intermedias (80–90:1) permitieron obtener los mejores resultados productivos para *H. erinaceus*.

Los sustratos presentados en este estudio, principalmente el olote de maíz, el rastrojo de maíz y el grupo control se caracterizan por presentar relaciones C/N intermedias (80–90:1) y una adecuada porosidad, lo que favorece una colonización micelial homogénea (Figura 5). Estos resultados coinciden con lo reportado por Ko *et al.* (2005) y Hřebečková *et al.* (2024), quienes señalan que el crecimiento óptimo ocurre en sustratos con carbono moderadamente alto y suficiente nitrógeno para la síntesis proteica. Además, esta tendencia coincide con lo reportado por Lu *et al.* (2025), quienes observaron que, al sustituir parcialmente astillas de madera por paja en el cultivo de *H. erinaceus*, la tasa de crecimiento micelial se incrementó con proporciones de reemplazo del 20 %, 30 % y 40 %, siendo particularmente favorable con paja de soja, colza y maíz, que produjeron micelios más blancos, gruesos y densos en comparación con otros tipos de paja. Estos hallazgos refuerzan la importancia de seleccionar materiales lignocelulósicos con propiedades físicas y nutricionales adecuadas para optimizar el desarrollo micelial.

Eficiencia biológica y tasa de producción

Los resultados de eficiencia biológica (EB) y tasa de producción (TP) indican que sustratos con relaciones C/N intermedias, como el olote de maíz y el grupo control, los cuales alcanzaron de EB entre 64.72 y 63.58 % respectivamente y TP hasta de 11.38 y 12.64 g/día (Figuras 6 y 7), son los más adecuados para la producción de cuerpos fructíferos. Esta tendencia concuerda con investigaciones recientes que han evaluado el comportamiento productivo de *H. erinaceus* en diferentes formulaciones de sustrato. Chutimanukul *et al.* (2023) reportaron que la EB alcanzó sus valores más altos en los tratamientos con 100 % de aserrín de caucho (42.61 ± 0.93 %) y con la mezcla 75 % aserrín de caucho y 25 % aserrín de bambú (40.92 ± 1.20 %). En contraste, la EB se redujo progresivamente al aumentar la proporción de bambú, alcanzando su valor más bajo (14.47 ± 0.40 %) cuando se utilizó 100% de este material, lo que confirma que la capacidad productiva del hongo depende en gran medida de la proporción de aserrín de caucho en el sustrato. Por su parte, Lu *et al.* (2024) demostraron que la sustitución de madera por residuos agrícolas puede optimizar los rendimientos cuando se emplean formulaciones balanceadas. Su fórmula compuesta por 16.3 % paja de arroz, 59.7 % mazorca, 20.0 % salvado de trigo, 2.0 % yeso, 1.0 % sacarosa y 1.0 % superfosfato de calcio, alcanzó una EB de 89.14 % con una producción de 445.69 g de setas frescas, además de acortar el ciclo de producción entre 7 y 9 días.

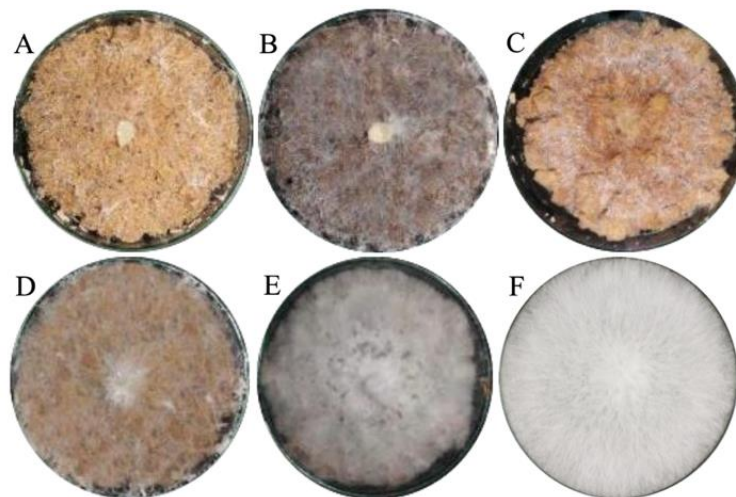


Figura 5. Crecimiento y desarrollo micelial de *Hericium erinaceus* en diferentes residuos lignocelulósicos. A) Aserrín de pino, B) Ocozal, C) Zacate de trigo, D) Rastrojo de maíz, E) Olote de maíz, F) Grupo control(50 % Aserrín de encino, 30 % Zacate de trigo y 20 % de Olote de maíz).

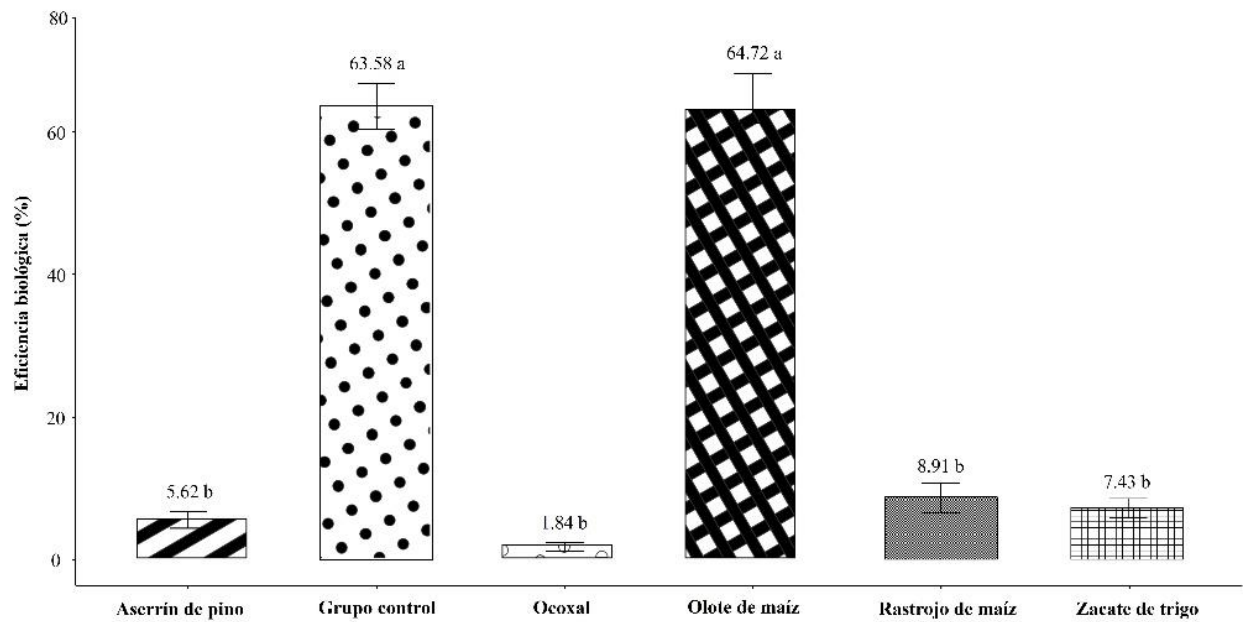


Figura 6. Eficiencia biológica (EB) del crecimiento de *Hericium erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

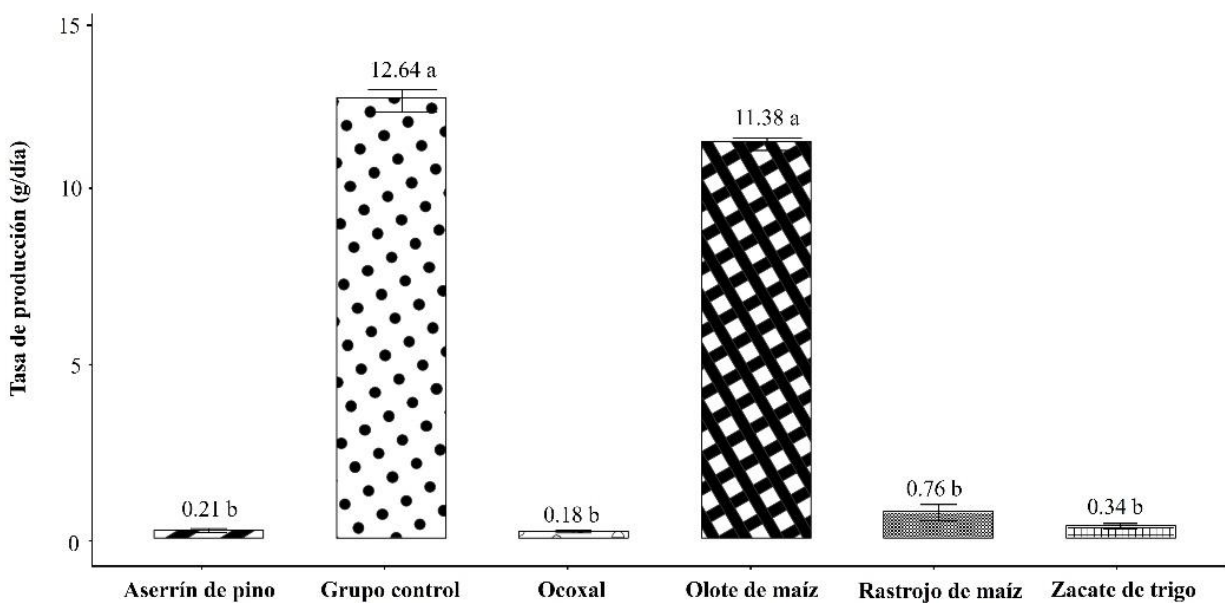


Figura 7. Tasa de producción (TP) del crecimiento de *Hericium erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El rastrojo de maíz y el zacate de trigo presentaron eficiencias biológicas moderadas (8.91 y 7.43 %), mientras que el ocoxal y el aserrín de pino reflejaron los valores más bajos (< 6 %) debido a su baja disponibilidad de nitrógeno y lenta mineralización (Suwannarach *et al.*, 2022). Durante la incubación, el zacate de trigo mostró zonas húmedas, decoloración y olor amoniacal asociada a su elevado contenido de nitrógeno y humedad, condiciones que favorecen

bacterias competidoras como *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. (Lu *et al.*, 2024). Este tipo de contaminación es especialmente crítico para especies de crecimiento lento como *H. erinaceus*, cuyo micelio coloniza el sustrato más lentamente que *P. ostreatus* (Ko *et al.*, 2005; Lazur *et al.*, 2024) y limitada capacidad para modificar el pH del medio (Chutimanukul *et al.*, 2023). El control estricto de humedad, pH y suplementación nitrogenada es

indispensable para evitar compactación, reducir el desarrollo bacteriano y asegurar una adecuada aireación (Gregori *et al.*, 2007).

El grupo control (12.64 g/día) y el olote de maíz (11.38 g/día) presentan las mayores tasas de producción, siendo significativamente superiores al resto de los tratamientos. En contraste, los materiales como aserrín de pino, ocotal, rastrojo de maíz y zacate de trigo registran valores muy bajos (entre 0.18 y 0.76 g/día), lo que indica que no existen diferencias estadísticas entre ellos, pero sí respecto a los tratamientos más productivos. Esto evidencia que el uso de olote de maíz alcanza un rendimiento alto similar al control, mientras que los demás sustratos tienen un impacto limitado en la producción.

La Figura 8 muestra el crecimiento micelial y la formación de cuerpos fructíferos de *H. erinaceus* en sustratos lignocelulósicos distintos. En los tratamientos A (aserrín de pino), B (ocoxal) y C (zacate de trigo), se observa principalmente colonización del sustrato por el micelio, con ausencia visible de cuerpos

fructíferos bien desarrollados, lo que sugiere un desarrollo limitado en estas condiciones. En la imagen D (rastrojo de maíz), el micelio cubre de forma densa y homogénea el sustrato; sin embargo, aún no se evidencia una diferenciación clara hacia estructuras fructíferas.

En contraste, los tratamientos E (olote de maíz) y F (grupo control) presentan la formación evidente de cuerpos fructíferos de morfología característica, con estructuras compactas, blancas y bien definidas que emergen de la superficie colonizada. Estos resultados visuales son consistentes con los valores de eficiencia biológica y tasa de producción reportados, donde el olote de maíz y el grupo control mostraron los mayores rendimientos, lo que confirma que los sustratos con una composición más equilibrada, particularmente aquellos con relaciones C/N intermedias, favorecen no solo la colonización, sino también la diferenciación y producción efectiva de cuerpos fructíferos en *H. erinaceus*.



Figura 8. Crecimiento y desarrollo de cuerpos fructíferos de *Hericium erinaceus* en diferentes residuos lignocelulósicos. A) Aserrín de pino, B) Ocoxal, C) Zacate de trigo, D) Rastrojo de maíz, E) Olote de maíz, F) Grupo control (50 % Aserrín de encino, 30 % Zacate de trigo y 20 % de Olote de maíz).

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que los residuos lignocelulósicos del Altiplano poblano constituyen sustratos viables para el cultivo de *H. erinaceus*, aunque no completamente eficiente por sí solos, sin embargo, su eficiencia depende en gran medida de la formulación y combinación de los materiales.

El análisis filogenético de la región ITS confirmó que la cepa MA He1 pertenece a *H. erinaceus*, con alto soporte estadístico y adecuada convergencia del modelo bayesiano. La secuencia está registrada en GenBank bajo el número de acceso PX687867.

Los resultados evidenciaron que la productividad estuvo determinada principalmente por la relación C/N, la porosidad y la capacidad de retención de humedad del sustrato. En este sentido, el lote de maíz y el grupo control presentaron los mayores valores de eficiencia biológica y tasa de producción, lo que confirma que sustratos con relaciones C/N intermedias (80–90:1) favorecen la colonización micelial y la formación de cuerpos fructíferos. Por el contrario, materiales como el aserrín de pino y el ocoxal mostraron limitaciones asociadas a relaciones C/N elevadas y baja disponibilidad de nitrógeno, mientras que el zacate de trigo, pese a su alto contenido nitrogenado, presentó problemas de compactación y mayor susceptibilidad a contaminación microbiana.

En conjunto, estos hallazgos destacan que el uso estratégico de mezclas de residuos agrícolas regionales permite optimizar el balance nutricional y las propiedades físicas del sustrato para la producción de hongos comestibles, superando las limitaciones de los materiales individuales y representando una alternativa sustentable, replicable y pertinente para la valorización de subproductos lignocelulósicos y el fortalecimiento de sistemas agroproductivos rurales.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a las y los productores del municipio de Ocotepc, Puebla, por su valiosa colaboración, disposición y apertura durante el desarrollo del presente estudio. Asimismo, se agradece de manera especial al Comisariado Ejidal y al Presidente Municipal de Ocotepc, Puebla, por las facilidades otorgadas, el respaldo institucional y el acompañamiento brindado, los cuales permitieron el adecuado desarrollo de las actividades de investigación en el municipio.

Funding. Este estudio contó con el apoyo de una beca de maestría (CVU: 1035411) expedida por la

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Conflict of interest. Nothing to declare.

Compliance with ethical standards. Does not apply.

Data availability. With the corresponding author upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **A. Barajas-Montiel** – Conceptualization, methodology, Writing – original draft. **R.I. Pérez-López** – Formal analysis, data curation. **Ma. A. Valencia de Ita** – Methodology, supervision. **C. Parraguirre Lezama** – Formal analysis, validation. **A. Rivera** – Investigation, data curation. **A. Romero López** – Visualization, Writing – review and editing. **O. Romero-Arenas** – Conceptualization, supervision, writing – review and editing.

REFERENCES

- Altieri, M., 1999. *Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan Comunidad, Montevideo, Uruguay.
- Amezcu, M., Scholnik-Cabrera, A. and Villegas, E. 2026. Morphological and Molecular Characterization of Mexican *Hericiu erinaceus* Strains. *Journal of Biotechnology*, 417, pp. 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2026.04.016>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2016. Association of official Analytical chemists. Official methods of analysis. 20th edition.
- Atila, F. 2019. Lignocellulosic and proximate based compositional changes in substrates during cultivation of *Hericiu erinaceus* mushroom. *Scientia horticulturae*, 258, pp. e108779. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108779>
- Atila, F., Tüzel, Y., Faz-Cano, A. and Fernandez, J.A. 2017. Effect of different lignocellulosic wastes on *Hericiu americanu* yield and nutritional characteristics. *Journal Science Food Agriculture*, 97, pp. 606-612. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7772>

- Atila, F., Tuzel, Y., Fernández, J. A., Cano, A. F. and Sen, F. 2018. The effect of some agro-industrial wastes on yield, nutritional characteristics and antioxidant activities of *Hericium erinaceus* isolates. *Scientia Horticulturae*, 238, pp. 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.049>
- Balakrishnan, B. and Nair, M.C. 1995. Production technology of oyster mushroom, in *Advances in Horticulture*, Vol. 13. Mushroom Malhotra Publishing House, New Delhi, pp. 109-116.
- Bautista-Nava, E., Moreno-Fuentes, Á., Pulido-Silva, T. and Ávila-Pozos, R. 2007. Bases bioculturales para el aprovechamiento y conservación de los hongos silvestres comestibles en el municipio de Tenango de Doria, Hidalgo, México. En Á. Moreno-Fuentes, R. Valadez-Azúa, R. Mariaca, P. Mejía and T. Gutiérrez (Eds.), *Etnobiología y sistemas biocognitivos tradicionales: paradigmas en la conservación biológica y el fortalecimiento cultural*. UAEH–AEM/SLE, Pachuca, México. Pp. 226-230.
- Camargo, N. and Williams, D. 2012. Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16, pp. 142–156.
- Chutimanukul, P., Phatthanamas, W., Thepsilvisut, O., Chantarachot, T., Thongtip, A. and Chutimanukul, P. 2023. Commercial scale production of Yamabushitake mushroom *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. 1797 using rubber and bamboo sawdust substrates in tropical regions. *Scientific Reports*, 13, pp. e13316. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40601-y>
- Figlas, D., Ramiro, G. M. and Nestor, R. C. 2007. Cultivation of culinary-medicinal lion's mane mushroom *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers. on substrate containing sunflower seed hulls. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 9, pp. 67-73. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v9.i1.80>
- Garibay-Orijel, R. and Ruan-Soto, F. 2014. Listado de los hongos silvestres consumidos como alimento tradicional en México. En Á. Moreno-Fuentes and R. Garibay-Orijel (Eds.), *La etnomicología en México. Estado del arte*. CONACYT–UAEH–Instituto de Biología UNAM–Sociedad Mexicana de Micología–AEM–GIDEM–SLE, México, D.F. pp. 91-112.
- Gregori, A., Švagelj, M. and Pohleven, J. 2007. Cultivation techniques and medicinal properties of *Pleurotus* spp. *Food Technology and Biotechnology*, 45, pp. 238-249.
- Han, H. and Xu, J. 2026. *Hericium erinaceus*, the lion's mane mushroom. In *Mushroomology*, Wageningen Academic. pp. 540-555. https://doi.org/10.1163/9789004751699_20
- Hoa, H. T., Wang, C. L. and Wang, C. H. 2015. The effects of different substrates on the growth, yield and nutritional composition of two oyster mushrooms *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*. *Mycobiology*, 43, pp. 423-434. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.423>
- Hřebečková, T., Wiesnerová, L., Hanč, A. and Koudela, M. 2024. Effect of substrate moisture content during cultivation of *Hericium erinaceus* and subsequent vermicomposting of spent mushroom substrate in a continuous feeding system. *Scientia Horticulturae*, 334, pp. e113310. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113310>
- Imtiaj, A., Jayasinghe, C., Lee, G.W., Shim, M.J., Rho, H.S., Lee, H.S., Hur, H., Lee, M.W., Lee, U.Y. and Lee, T.S. 2008. Vegetative Growth of Four Strains of *Hericium erinaceus* Collected from Different Habitats. *Micobiología*, 36(2), pp. 88-92. <https://doi.org/10.4489/MYCO.2008.36.2.088>
- Jahedi, A., Ahmadifar, S. and Mohammadigoltapeh, E. 2024. Revival of wild edible-medicinal mushroom (*Hericium erinaceus*) based on organic agro-industrial waste-achieving a commercial protocol with the highest yield; optimum reuse of organic waste. *Scientia Horticulturae*, 323, pp. e112510. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112510>
- Ko, H. G., Park, H. G., Park, S. H., Choi, C. W., Kim, S. H. and Park, W. M. 2005. Comparative

- study of mycelial growth and basidiomata formation in seven species of the edible mushroom genus *Hericium*. *Bioresource Technology*, 96, pp. 1439-1444. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.009>
- Lackner, M. and Besharati, M. 2025. Agricultural waste: challenges and solutions, a review. *Waste*, 3(2), e18. <https://doi.org/10.3390/waste3020018>
- Lazur, J., Kała, K., Krakowska, A., Sułkowska-Ziaja, K., Szewczyk, A., Piotrowska, J. and Muszyńska, B. 2024. Analysis of bioactive substances and essential elements of mycelia and fruiting bodies of *Hericium* spp. *Journal of Food Composition and Analysis*, 127, pp. e105981. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.105981>
- Li, H., Zhao, H., Liu, W., Feng, Y., Zhang, Y., Yuan, F. and Jia, L. 2021. Liver and brain protective effect of sulfated polysaccharides from residue of lion's mane medicinal mushroom *Hericium erinaceus* on D-galactose-induced aging mice. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 23, pp. 55-65. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.2021038241>
- Lu, Z., Liu, L., Ren, Z., Hu, S., Wang, Y., Ji, S. and Yu, Y. 2024. Optimization of substrate formulation for *Hericium erinaceus* by replacing wood by straw and their effect on enzyme activities. *Frontiers in Plant Science*, 15, pp. e1436385. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436385>
- Lu, Z., Yang, Y., Hu, S., Ma, Y. K., Ren, Z. M., Wang, Y. and Huang, X. 2025. The agronomic traits differences in *Hericium erinaceus* cultivated with different straw formulations by replacing wood with straw. *Horticulturae*, 11, pp. e1220. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11101220>
- Martínez-Carrera, D., Larqué-Saavedra, A., Aliphath, M., Aguilar, A., Bonilla, M. and Martínez, W. 2000. La biotecnología de hongos comestibles en la seguridad y soberanía alimentaria de México. *Memorias II foro nacional sobre seguridad y soberanía alimentaria*, pp. 193-207.
- Martínez-Carrera, D., Leben, R., Morales, P., Sobal, M. and Larqué-Saavedra, A. 1991. Historia del cultivo comercial de los hongos comestibles en México. *Ciencia y Desarrollo*, 96, pp. 33-43.
- Martínez-Carrera, D., Morales, P., Sobal, M., Bonilla, M., and Martínez, W. 2007. México ante la globalización en el siglo XXI: el sistema de producción-consumo de los hongos comestibles. *El cultivo de setas Pleurotus spp. en México*, pp. 1-120.
- Martínez-Guerrero, M. A., Sihuanca, D., Macías-López, A., Pérez-López, R. I., Martínez-Madrigal, J. D. and López-Olguín, J. F. 2012. Characterization and production of Shiitake (*Lentinula edodes*) in Mexico using supplemented sawdust. *African Journal of Biotechnology*, 11(46), pp. 10582-10588. <https://doi.org/10.5897/AJB12.266>
- Mata, G. and Salmones, D. 2021. Técnicas de aislamiento, cultivo y conservación de cepas de hongos en el laboratorio. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, México. XX, 163 p.
- Miles, P. G. and Chang, S. T. 2004. *Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect and environmental impact*. CRC Press, Boca Raton, USA. 431 p.
- 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. Seminario de Título para optar al grado de Ingeniero en Biotecnología Molecular. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Santiago, Chile, 87 pp.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed.). ASA-SSSA, Madison, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Ofori, F. K., Yu, X., Wang, Q. and Li, H. 2016. Nutrient optimization using response surface methodology for simultaneous biomass and bioactive compound

- production by lion's mane medicinal mushroom *Hericium erinaceus*. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 18, pp. 215-226. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushroom.s.v18.i3.40>
- Portilla-Segura, A., Romero-Arenas, O., Valencia de Ita, M. D. L. Á., Hernández-Espinosa, M. Á., Lanteta-Cortés, G. and Rivera-Tapia, J. A. 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, pp. e1216. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1216>
- R Core Team. 2024. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Romero-Arenas, O., Flores-Flores, A. D. P., Rivera-Tapia, J. A., Hernández-Aldana, F., Parraguirre-Lezama, J. F. C., and Villa-Ruano, N. 2019. Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* en composta a base de residuos de shiitake en vivero. *Madera y Bosques*, 25(1), pp. e251167. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511675>
- Romero-Arenas, O., Huerta, M., Damián, M. A., Macías, A., Tapia, A. M., Parraguirre, J. F. and Juárez, J. 2010. Evaluación de la capacidad productiva de *Pleurotus ostreatus* utilizando hoja de plátano deshidratada (*Musa paradisiaca* L.). *Agronomía Costarricense*, 34, pp. 53-63.
- Royse, D. J., Baars, J. and Tan, Q. 2017. Current overview of mushroom production in the world. En P. G. Miles & S. T. Chang (Eds.), *Edible and medicinal mushrooms: technology and applications* (pp. 5-13). CRC Press, Boca Raton, USA. <https://doi.org/10.1002/9781119149446.ch2>
- Salmones, D., Mata, G., Gaitán-Hernández, R. and Ortega, C. 2020. Cepas de *Pleurotus pulmonarius* con alta capacidad productiva seleccionadas de micelios dicarióticos. *Scientia Fungorum*, 50, pp. 1-11. <https://doi.org/10.33885/sf.2020.50.1270>
- SIAP. 2024. *Panorama agroalimentario 2018–2024*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, México.
- SIAP-SAGARPA. 2022. *Estadísticas agrícolas de México 2022*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, México.
- Suwannarach, N., Kumla, J., Zhao, Y. and Kakumyan, P. 2022. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity: a review. *Biology*, 11, pp. e569. <https://doi.org/10.3390/biology11040569>
- Szućko-Kociuba, I., Trzeciak-Ryczek, A., Kupnicka, P. and Chlubek, D. 2023. Neurotrophic and neuroprotective effects of *Hericium erinaceus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, pp. e15960. <https://doi.org/10.3390/ijms242415960>
- Tornberg, K., Bååth, E., and Olsson, S. 2003. Fungal growth and effects of different wood decomposing fungi on the indigenous bacterial community of polluted and unpolluted soils. *Biology and Fertility of Soils*, 37, pp. 190-197. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0574-1>
- Wendiro, D., Wacoo, A. P. and Wise, G. 2019. Identifying indigenous practices for cultivation of wild saprophytic mushrooms: responding to the need for sustainable utilization of natural resources. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 15(1), pp. 2-15. <https://doi.org/10.1186/s13002-019-0342-z>