

Artículo de investigación

# Productividad de *Pleurotus ostreatus* en dos sustratos preparados por vapor e inmersión en agua caliente: consumo de agua y gas

## Productivity of *Pleurotus ostreatus* in two substrates prepared by steam and hot water immersion: Water and Gas Consumption

Diego Armando Aguilar-Ventura<sup>1</sup> , Ricardo Serna-Lagunes<sup>1</sup> , Noé Aguilar-Rivera<sup>1</sup> , Pedro Zetina-Córdoba<sup>3</sup> , Gerardo Mata<sup>2</sup> , Régulo Carlos Llarena-Hernández<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Veracruzana, Camino Peñuela-Amatlán S/N Peñuela, municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, venturi\_1701@hotmail.com, rserna@uv.mx, naguilar@uv.mx, rllarena@uv.mx\*

<sup>2</sup> Instituto de Ecología, A.C. Carretera antigua a Coatepec 351, CP. 91073. Col. El Haya, Xalapa, Veracruz, México, direccion.general@inecol.mx

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Huatusco, Predio Axol, S/N, 94106, Col. Reserva Territorial, Huatusco, Veracruz, México, uphuatusco@uphuatusco.edu.mx

\* Autor por correspondencia: rllarena@uv.mx

**Recibido:** 1 de marzo de 2024. **Revisado:** 13 de mayo de 2024. **Aceptado:** 13 de marzo de 2025

**Editor asociado:** Mónica Navia

**Citation/ citar este artículo como:** Aguilar-Ventura, D. A., Serna-Lagunes, R., Aguilar- Rivera, N., Zetina-Córdoba, P., Mata, G. y Llarena-Hernández, R. C. (2025). Productividad de *Pleurotus ostreatus* en dos sustratos preparados por vapor e inmersión en agua caliente: consumo de agua y gas. *Acta Biol. Colomb.*, 30(2), 27-36. <https://doi.org/10.15446/abc.v30n2.112399>

### RESUMEN

En la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus*, los sustratos de residuos lignocelulósicos son tratados térmicamente antes de la inoculación del hongo. Sin embargo, el consumo de agua y energía en la preparación del sustrato aún no ha sido caracterizada a pequeña escala en términos económicos y ambientales. El objetivo de este estudio fue comparar la productividad de *Pleurotus ostreatus* cultivado en dos sustratos y su relación con el consumo de agua y gas licuado de petróleo (GLP) durante la preparación de los sustratos por inmersión en agua caliente (IAC) o utilizando vapor (V). Las variables de productividad evaluadas fueron eficiencia biológica (EB), tasa de producción, rendimiento, ciclo de producción, y número y peso de esporomas. Se encontró que el índice de consumo de agua (1,08 L) y de GLP (0,088 kg) fue menor al preparar 1 kg de sustrato (peso húmedo) por V, que por IAC (3,02 L de agua y 0,12 kg de GLP). Sin embargo, con una EB de 84 a 90 %, la productividad fue superior en los sustratos preparados por IAC. La EB y la humedad del sustrato se correlacionaron positivamente ( $r_s = 0,82, p < 0,05$ ), por lo que el proceso de preparación de sustrato por V genera un medio viable para producir *P. ostreatus* con un uso eficiente de agua y GLP.

**Palabras clave:** Agaricales, comestible, cultivo, micelio, rendimiento.

### ABSTRACT

In the production of edible mushrooms of the genus *Pleurotus*, lignocellulosic waste substrates are heat-treated prior to fungal inoculation. However, water and energy consumption in substrate preparation has not yet been characterized on a small scale in terms of economic and environmental impact. The objective of the study was to compare the productivity of *Pleurotus ostreatus* grown on two substrates and its relationship with water and liquefied petroleum gas (LPG) consumption during substrate preparation by immersion in hot water (IHW) or using steam (S). Productivity variables measured included biological efficiency (BE), production rate, yield, production cycle, and number and weight of sporomes. It was found that water (1.08 L) and LPG (0.088 kg) consumption was lower when preparing 1 kg of substrate (wet weight) using S than when using IHW (3.02 L of water and 0.12 kg of LPG). However, with a BE of 84 to 90 %, productivity was highest in substrates prepared by IHW. BE and substrate moisture were positively correlated ( $r_s = 0.82, p < 0.05$ ), thus the substrate preparation process by S generates a viable medium to produce *P. ostreatus* with efficient use of water and LPG.

**Keywords:** Agaricales, cultivation, edible, mycelium, yield.



## INTRODUCCIÓN

Los hongos del género *Pleurotus* son un alimento con alto valor nutricional (Ye *et al.*, 2023). La biotecnología para su cultivo recomienda sustratos lignocelulósicos para satisfacer los requerimientos nutricionales del hongo (Valencia de Ita *et al.*, 2018). La productividad del cultivo de *Pleurotus* spp. se evalúa, entre otras variables, mediante la eficiencia biológica (EB), la cual mide la bioconversión de los materiales lignocelulósicos en la producción de cuerpos fructíferos o esporomas (Romero-Arenas *et al.*, 2018). En *P. ostreatus*, la EB se ha reportado en pasto pangola (*Digitaria eriantha*) tratado por vapor, inmersión alcalina o por composteo, con valores de 102, 62 y 112 % respectivamente (Barrios-Espinoza *et al.*, 2009). En paja de trigo (*Triticum aestivum*) tratada por inmersión en agua caliente se reporta un 75,8 % (Jaramillo-Mejía y Albertó, 2013), y en rastrojo de maíz (*Zea mays*) tratado con agua caliente fue de 64,3 % (Romero-Arenas *et al.*, 2018). La productividad y rendimientos determinados por la EB, indican que este sistema agroalimentario es una alternativa novedosa que contribuye en el cierre de ciclos de cultivos agrícolas a partir del aprovechamiento de sus desechos orgánicos (Dorr *et al.*, 2021).

El cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* a pequeña y gran escala implica diversas actividades por parte del cultivador, como la preparación del sustrato, la inoculación del hongo, la incubación, la fructificación y la cosecha (Nongthombam *et al.*, 2021). Entre las técnicas de mayor uso en la preparación de sustrato destacan la inmersión en agua caliente a 80 °C durante 90 min (Jaramillo-Mejía y Albertó, 2013) y el uso de vapor de agua inyectado en túneles (Bellettini *et al.*, 2019). Para un adecuado aprovechamiento del sustrato lignocelulósico en la obtención de esporomas de *Pleurotus* spp. y alcanzar altos rendimientos, la técnica de preparación del sustrato, previa a la inoculación del hongo, debe proveer la humedad adecuada para que no interfiera en la correcta oxigenación del hongo (Patel *et al.*, 2009), un contenido de humedad de 70 % (Huerta *et al.*, 2009; Jaramillo-Mejía y Albertó, 2019), un pH entre seis y ocho (Morales y Sánchez, 2017), una eficaz eliminación de organismos antagónicos en el cultivo como los mohos verdes producidos por *Trichoderma* spp. (Nongthombam *et al.*, 2021), y aportar nutrientes como proteína cruda (Romero-Arenas *et al.*, 2018), fuentes de carbono contenidos en la lignocelulosa, macro y micronutrientes (Vega *et al.*, 2022). La técnica de aplicación de vapor de agua como medio de esterilización del sustrato en autoclave o por pasteurización en túneles demanda un elevado costo energético (Barrios- Espinoza *et al.*, 2009; Iossi *et al.*, 2018). No obstante, la técnica de preparación de sustrato por inmersión en agua caliente produce un menor rendimiento comparado con la técnica de vapor (Jaramillo-Mejía y Albertó, 2013), aunque esto depende de los sustratos empleados (Vega *et al.*, 2022). En función de lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar

dos metodologías (inmersión en agua caliente y vapor con modificaciones) para preparar dos sustratos para cultivo de *P. ostreatus* considerando el uso eficiente de agua y gas licuado de petróleo (GLP), así como la productividad de este hongo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Cepa y sustratos evaluados

Se utilizó la cepa comercial IE115 de *P. ostreatus* (Jacq. ex Fr.) Kumm, proveniente del banco de germoplasma del Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz, México. La cepa se cultivó sobre rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) (RM) y sobre hojas del residuo de cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), conocido localmente como tlazole (T). Los sustratos se cortaron a un tamaño de 1 a 2 cm de ancho por 3 a 4 cm de largo usando un machete (Truper®), de acuerdo con las recomendaciones de Barrios-Espinoza *et al.* (2009), el tamaño de partícula se midió con vernier Mitutoyo® modelo estándar.

### Preparación de los sustratos

Los sustratos fueron preparados por inmersión en agua caliente (IAC) y por vapor (V). En la preparación por IAC, los sustratos (18 kg peso seco) fueron colocados en sacos de arpillería de polipropileno. Se usó un contenedor cilíndrico de metal (60 cm de diámetro por 86 cm de alto), con capacidad de 243 L, al cual se le agregaron 136 L de agua del grifo (pH: 7,3 y CE: 200 µS) y 10 % de hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>], con base al peso seco total de los sustratos. El agua se calentó durante 2,15 h, usando un quemador tipo bote con una altura de 6,5 cm y salida de flama de 9 cm de diámetro, y GLP como combustible. La temperatura se registró con un datalogger (Model GSP-6®) cuya sonda fue colocada 20 cm debajo de la superficie del interior del contenedor donde se prepararon los sustratos. Cuando la temperatura del agua fue de 70 a 80 °C, esta se mantuvo durante 1 h y los sustratos RM y T se depositaron al interior del contenedor, el cual se mantuvo abierto durante el tratamiento. Posteriormente, los sustratos se escurrieron y enfriaron durante 1 h sobre una mesa de acero inoxidable (80 cm de ancho × 1,20 m de largo y bordes de 6 cm de alto con un desnivel del 1 %). Todo en condiciones asépticas mediante desinfección previa con alcohol al 70 %.

En la preparación por vapor se utilizó un contenedor metálico similar al empleado en la preparación por IAC. Al contenedor se le agregaron 18 L de agua de grifo y se colocó una parrilla metálica a 25 cm del fondo como soporte del sustrato. Para mantener los sustratos RM y T (base seca) a un 65 % de humedad se mezclaron 5 kg de cada sustrato evaluado con 9,25 L de agua del grifo y 2 % de hidróxido de calcio (con base al peso seco del sustrato). El contenido de

humedad (%) se estimó como: peso final de la muestra/peso inicial de la muestra

‘ 100. Se llenaron bolsas de polietileno con 1 kg del sustrato hidratado y se colocaron sobre la parrilla metálica dentro del contenedor. Las bolsas con sustrato no fueron cerradas herméticamente para evitar alguna alteración (ruptura) por la temperatura o vapor generado al interior del contenedor. Después de 24 h (el tiempo esperado garantizó la eliminación de microrganismos competidores, ya que cuando únicamente se hidrató el sustrato y en seguida se aplicó vapor hubo presencia de contaminantes, datos no mostrados) se aplicó calor al contenedor durante 2 h. La parte superior del contenedor se cubrió con una cobertura plástica para minimizar la pérdida de calor generado por vapor. En el interior del contenedor se generó vapor de agua a una temperatura de  $97 \pm 2$  °C. La temperatura se registró con un datalogger (Model GSP-6, Elitech® cuya sonda fue colocada en la parte interior, 20 cm debajo de la cubierta plástica. El sustrato se enfrió dentro del contenedor a temperatura ambiente durante 22 h. El volumen de agua y los kilogramos de sustrato empleados en IAC y por V, fueron cantidades necesarias para aprovechar al máximo la capacidad del contenedor metálico empleado.

### Aplicación térmica, humedad y pH de los sustratos

La relación temperatura/tiempo a la que fueron sometidos los sustratos se calculó de acuerdo con Morales y Sánchez (2017). Para la IAC, la temperatura del agua fue monitoreada cada 15 min durante el proceso (con el fin de mantener mayor control del momento de inmersión de los sustratos), mientras que en la preparación de sustratos por V la temperatura se registró cada hora. Para determinar la humedad del sustrato (HS) se tomaron tres muestras de 10 g. Las muestras fueron colocadas en charolas de aluminio dentro de un horno de secado a  $100 \pm 5$  °C durante 24 h, y posteriormente se pesaron. El pH se midió con un potenciómetro (modelo PC 2700, Oakton®) a partir del extracto líquido de los sustratos. Para esto, se tomaron tres muestras de 10 g de sustrato de cada tratamiento, las cuales fueron colocadas en vasos de precipitado de 250 ml que contenían 25 ml de agua destilada y fueron incubadas sin agitación por 20 min a temperatura ambiente ( $25 \pm 2$  °C)

**Tabla 1.** Tratamientos evaluados en la producción de *Pleurotus ostreatus* cepa IE115

Tratamiento	Método de preparación del sustrato	Rastrojo de maíz (%)	Tlazole (%)
T1	Inmersión en agua caliente	100	0
T2	Inmersión en agua caliente	70	30
T3	Inmersión en agua caliente	50	50
T4	Vapor	100	0
T5	Vapor	70	30
T6	Vapor	50	50

(Barrios-Espinoza *et al.*, 2009). La HS y el pH se determinaron después de la preparación de los sustratos por IAC y por V.

### Medición del consumo de agua y GLP en la preparación de los sustratos

En cada técnica de preparación de sustrato se determinó:

- (i) Consumo de agua requerida en el sistema = agua retenida en los sustratos + agua para el tratamiento térmico aplicado.
- (ii) Consumo de GLP requerido en el sistema = peso inicial del tanque que contiene GLP – peso final del tanque que contiene GLP.
- (iii) Consumo de agua para preparar 1 kg de sustrato (peso húmedo) = Agua total requerida en el sistema / sustrato total preparado.
- (iv) Consumo de GLP para preparar 1 kg de sustrato (peso húmedo) = Consumo de GLP requerido en el sistema / sustrato total preparado.

### Inoculación de *Pleurotus ostreatus* y parámetros de producción

El experimento fue establecido mediante un diseño completamente al azar, atribuyendo la variabilidad a los tratamientos evaluados (Morales y Sánchez, 2017). La productividad de la cepa IE115 de *P. ostreatus* se evaluó en seis tratamientos con cinco repeticiones. Los tratamientos incluyeron dos métodos de preparación del sustrato y tres mezclas de los sustratos a diferentes proporciones (Tabla 1). Las proporciones de los sustratos se eligieron por la porosidad y capacidad de retención de humedad de cada sustrato, por lo que, en este estudio no se evaluó el T en una proporción del 100 % debido a que en pruebas previas no fue posible ajustar el umbral de humedad requerido. Las unidades experimentales (UE) consistieron de bolsas de polietileno con 1 kg de sustrato (peso húmedo) e inoculadas con 50 g (5 % p/p) de micelio (Huerta *et al.*, 2009); el inóculo se elaboró con granos de sorgo (*Sorghum sp.*) y la cepa IE115 de acuerdo con el protocolo descrito por Roblero-Mejía *et al.* (2021). Para facilitar la oxigenación, cada bolsa fue perforada en la parte frontal y trasera, la perforación fue de 1 por 3 cm la cual se cubrió con tela Pellón®. Las UE se incubaron a temperatura ambiente y en ausencia de luz. Cuando el micelio colonizó el sustrato y se observaron formaciones de primordios (Besufekad *et al.*, 2020), las UE se trasladaron al área de fructificación con temperatura ambiente ( $23,1 \pm 1$  °C), esta se registró con datalogger Model GSP-6, Elitech® y 95 % humedad controlada con humidificador nebulizador pulverizador integrado con control dual de temperatura y humedad H2O TEK®. Los racimos de esporomas se cosecharon cuando la superficie del píleo tenía forma plana o márgenes ligeramente enrollados (siempre que al menos el 75 % de los esporomas que conforman cada racimo cumplieran con las condiciones anteriores) (Yang *et al.*, 2013).

A partir de cada UE se realizaron tres cosechas de esporomas, los cuales se pesaron (g) y contabilizaron. Se registró el Número Total de Esporomas (NTE), el Peso Fresco Total de Esporomas (PFTE) y el Peso Seco Total de

Esporomas (PSTE). La Eficiencia Biológica (EB) se calculó como: (peso fresco de esporomas cosechados / peso seco del sustrato) × 100, Tasa de Producción (TP) = (EB / tiempo en días transcurridos desde la inoculación hasta la última cosecha), Rendimiento (R) = (peso seco de los esporomas / peso seco del sustrato) × 100 (Ríos-Ruiz *et al.*, 2017) y el Ciclo de Producción (CP) = (días transcurridos desde la inoculación del hongo hasta el final de la tercera cosecha) (Romero-Arenas *et al.*, 2018).

## Análisis de datos

Los valores obtenidos de la temperatura/tiempo en que fueron tratados los sustratos por IAC y por V se analizaron mediante una regresión lineal simple, obteniendo el intervalo de predicción y las bandas de confianza inferior y superior a un 95 % de confiabilidad. Para determinar el incremento y decrecimiento promedio de temperatura se obtuvieron los coeficientes del modelo de regresión, la pendiente y el intercepto. Igualmente se calculó el coeficiente de determinación  $R^2$  y el  $p$ -valor. La distribución normal de los datos se evaluó usando la prueba Shapiro-Wilks = 0,9 y  $p$ -unilateral ( $D$ ) > 0,05 (Zar, 2010). Las variables de respuesta que cumplieron el supuesto de normalidad (HS, pH, NTE, PFTE, PSTE, EB, TP y R) se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) con un alfa = 0,05. Las diferencias entre las medias se evaluaron con una prueba de Duncan. La variable que no cumplió con el supuesto de normalidad (CP) se sometió a un análisis de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis y prueba de medias de rangos pareadas ( $p < 0,05$ ) (Balzarini *et al.*, 2008). Se analizó la tendencia de la producción mediante una regresión lineal y se obtuvo la pendiente, el intercepto,  $R^2$  y el  $p$ -valor; como variables independientes se tomaron los tratamientos de sustrato evaluados de acuerdo a la proporción combinada de RM y T, así como HS; como variables dependientes EB, TP, R, PFTE, PSTE y NTE. Se aplicó una prueba de correlación de Spearman entre las variables independientes (HS y pH del sustrato) y las variables de respuesta EB, TP, R, PFTE, PSTE, NTE y CP. Los análisis se realizaron con el software estadístico InfoStat® Versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

## RESULTADOS

### Aplicación térmica, humedad y pH de los sustratos

En la preparación de los sustratos por IAC (tratamientos 1, 2 y 3), el incremento promedio de la temperatura/tiempo fue modelado por  $y = 0,42x + 32,38$ , con un  $R^2 = 0,8877$ ,  $p < 0,0001$ . Por lo que, la temperatura aumentó 0,42 °C por cada minuto de aplicación de calor. La temperatura objetivo de 70 a 80 °C, que garantizó una adecuada preparación de los sustratos, se alcanzó a los 75 min y finalizó a los 135 min desde el inicio del proceso térmico (Fig. 1a). La técnica

de preparación de los sustratos por IAC requirió un tiempo total de 2,15 h.

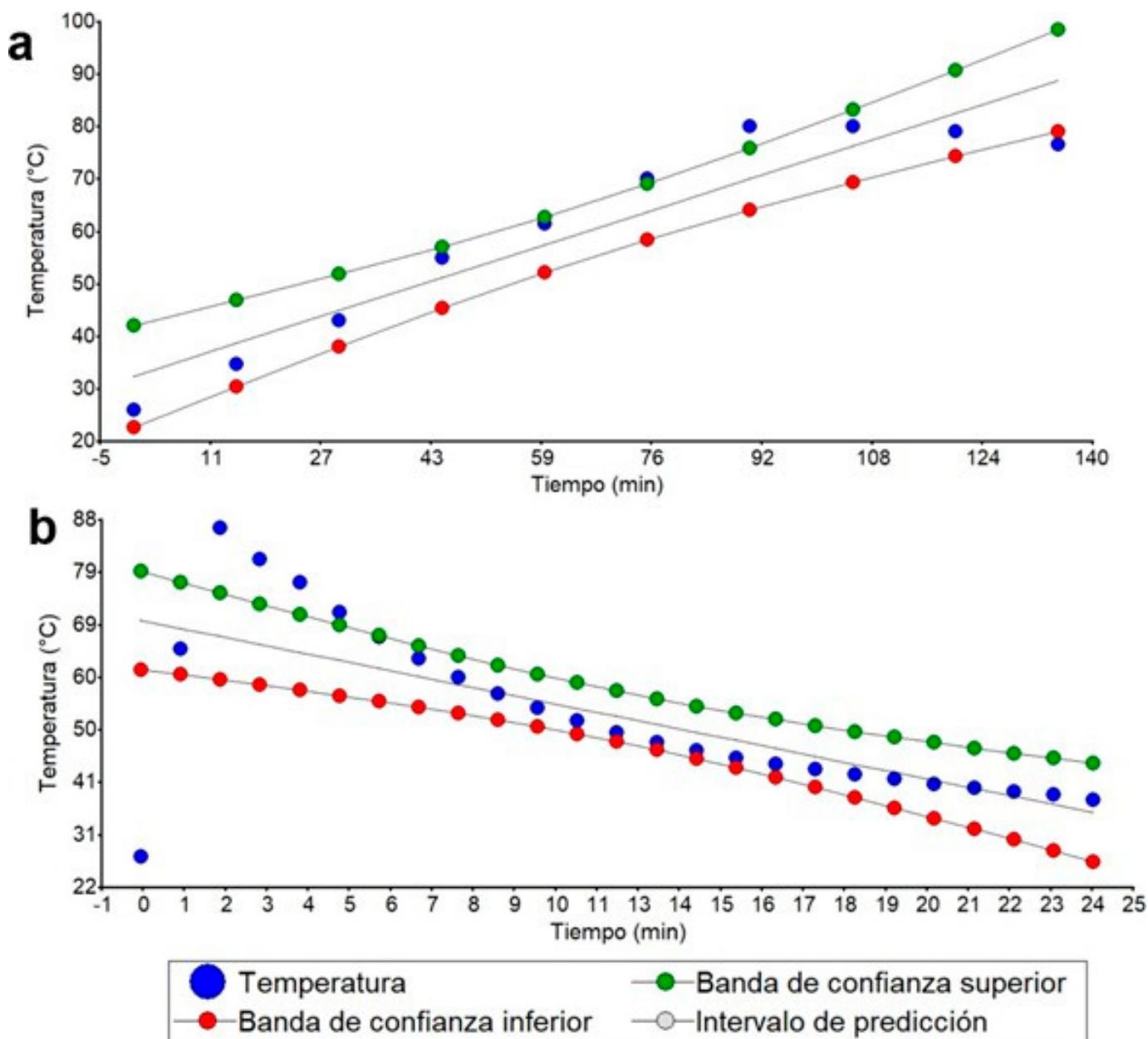
El proceso de preparación de los sustratos por V (tratamientos 4, 5 y 6) tuvo una duración total de 48 h. Durante las primeras 24 h los sustratos permanecieron al interior del contenedor a temperatura ambiente (25±2 °C). Posteriormente, durante la aplicación de calor desde la hora 0 a la hora 2 se observó un incremento exponencial de temperatura, en promedio de 29,55 °C/h lo cual fue modelado por  $y = 29,55x + 30,05$ , con un  $R^2 = 0,98$ ,  $p = 0,0969$ . La temperatura máxima alcanzada fue de 86,5 °C. Después que se dejó de aplicar calor, de la hora dos a la hora 24 el decrecimiento promedio de temperatura fue de 2,03 °C/h ( $y = -2,03x + 79,58$ , con un  $R^2 = 0,89$ ,  $p < 0,0001$ ). Esta disminución gradual de temperatura tuvo una duración de 22 h y se observó que después de retirar el suministro de calor, los sustratos permanecieron a una temperatura superior a 60 °C durante al menos 6 h (Fig. 1b). Respecto al intervalo de predicción y las bandas de confianza inferior y superior durante la primera hora de haber suministrado calor, se alcanzaron temperaturas de 60 a 70 °C adecuadas para tratar los sustratos por V, este intervalo de temperatura permaneció al menos durante 7 h (Fig. 1b). Los valores de contenido de humedad de los sustratos (HS) preparados por IAC y por V estuvieron en un intervalo de 66,6 a 72,9 %; y no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ( $p = 0,5910$ ) (Tabla 2). El pH de los sustratos en el momento de la inoculación del hongo fue ligeramente alcalino para el tratamiento T1 (pH 7,7) y moderadamente alcalino para los demás tratamientos (pH 7,9 a 8,2) (Tabla 2). Se encontraron diferencias significativas ( $p = 0,0045$ ) entre los tratamientos. El T1 y T4 fueron estadísticamente diferentes (Tabla 2).

### Consumo de agua y GLP

El consumo de agua total requerido para preparar 37,5 kg de sustrato (peso húmedo) por V fue de 40,5 L y 3,3 kg de GLP. Mientras que para preparar 45 kg de sustrato (peso húmedo) por IAC se emplearon 136 L de agua y 5,4 kg de GLP. Considerando el consumo por kg de sustrato, se encontró que en la preparación por V se emplearon 1,08 L de agua y 0,088 kg de GLP, mientras que por IAC se emplearon 3,02 L de agua y 0,12 kg de GLP.

### Parámetros de producción

Los parámetros EB, TP, R, PFTE, PSTE, NTE y CP se emplearon para evaluar la productividad de la cepa IE115 *P. ostreatus* en los diferentes tratamientos. Los valores de EB más altos se encontraron en los tratamientos T1, T2 y T3 (rangos de 84,1 a 90,5 %), entre los cuales no se detectaron diferencias significativas. Por el contrario, los valores EB más bajos se presentaron en los tratamientos T4 y T5, con 60,9 y 69,1 %, respectivamente (Tabla 3). La tendencia de EB con respecto a HS mostró un incremento de 4,24 % por



**Figura 1.** Aplicación térmica en la preparación de los sustratos. a: temperatura (°C)/tiempo (min) en la preparación de los tratamientos T1, T2 y T3 por inmersión en agua caliente (IAC), durante 135 min. b: temperatura (°C)/tiempo (h) en la preparación de los tratamientos T4, T5 y T6 por vapor (V), durante 2 h de aplicación de calor y enfriamiento a temperatura ambiente durante 22 h.

cada unidad de humedad; de acuerdo a la banda superior de confianza del modelo de predicción, con humedad en el sustrato de 66,6-68,4 % se puede alcanzar una EB máxima entre 70-76,7 % y mínima de 61-69,6 %, mientras que con humedad de 69,6-73 % es posible alcanzar EB máxima de 81,5-97,9 % y mínima de 75,4-87,5 % (Fig. 2). Los mayores valores de TP, R y PFTE fue en los tratamientos T1, T2, T3 y T6, los cuales no mostraron diferencias significativas (Tabla 3). No se encontraron diferencias entre tratamientos con respecto al PSTE ( $p = 0,3910$ ) (Tabla 3). El menor NTE fue en T4 con un valor de 41,2 esporomas, este tratamiento fue estadísticamente

igual a T1 y T2 (Tabla 3). Con respecto al CP, los tratamientos evaluados mostraron un intervalo de 45,8 a 51 días, y no se encontraron diferencias entre los tratamientos ( $p > 0,05$ ) (Tabla 3). El modelo de regresión, mostró un efecto positivo en la productividad a medida que se incrementa la proporción de T al combinarlo con RM, con excepción de las variables PFTE y PSTE en los tratamientos T1, T2 y T3, donde se observó valor negativo de la pendiente (Tabla 4).

En cuanto a la correlación entre las propiedades del sustrato (HS y pH) y los parámetros de producción de *P. ostreatus*, se encontró una correlación lineal positiva y

**Tabla 2.** Humedad y pH de los tratamientos después de la aplicación térmica por inmersión en agua caliente (IAC) y por vapor (V).

Medio preparación del sustrato	Tratamientos	Humedad (%)	pH
IAC	T1= RM100	69,68±0,72 <sup>a</sup>	7,74±0,08 <sup>c</sup>
IAC	T2= RM70+T30	71,67±3,56 <sup>a</sup>	7,98±0,02 <sup>bc</sup>
IAC	T3= RM50+T50	72,97±2,77 <sup>a</sup>	8,1±0,05 <sup>ab</sup>
V	T4= RM100	66,61±9,19 <sup>a</sup>	8,4±0,06 <sup>a</sup>
V	T5= RM70+T30	67,45±2,3 <sup>a</sup>	8,18±0,37 <sup>ab</sup>
V	T6= RM50+T50	68,36±5,75 <sup>a</sup>	8,26±0,09 <sup>ab</sup>

Los valores representan la media ± desviación estándar. Medias con diferente letra dentro de la columna son significativamente diferentes ( $p \leq 0,05$ ). RM: rastrojo de maíz. T: tlazole.

significativa entre la HS y los parámetros EB ( $r_s = 0,82; p < 0,05$ ), TP ( $r_s = 0,71; p < 0,05$ ), R ( $r_s = 0,66; p < 0,05$ ) y PFTE ( $r_s = 0,53; p < 0,05$ ). La correlación fue lineal positiva pero no significativa con el CP ( $r_s = 0,25; p > 0,05$ ), y el NTE ( $r_s = 0,35; p > 0,05$ ). La correlación entre el pH del sustrato y la EB, la TP y el PFTE fue negativa y significativa ( $p < 0,05$ ). Mientras que la correlación del pH con el R, el CP y el NTE fue negativa sin significancia estadística ( $p > 0,05$ ); y positiva no significativa ( $r_s = 0,04; p > 0,05$ ) con el PSTE.

## DISCUSIÓN

### Aplicación térmica, humedad y pH de los sustratos

En este estudio, la temperatura de 70 a 80 °C a la que fueron sometidos los sustratos correspondientes a los tratamientos T1, T2, y T3 de IAC fue similar a lo previamente propuesto por Díaz-Muñoz *et al.* (2019) y por Jaramillo-Mejía y Albertó (2013). Sin embargo, el tiempo que los sustratos fueron sometidos a estas temperaturas fue diferente, en este estudio nosotros empleamos 1 h y se obtuvo una EB de 84,1-90,5 %, mientras Díaz- Muñoz *et al.* (2019) reportaron una temperatura/tiempo de 80 °C/30 min obteniendo EB de 8,6-16,7 % y Jaramillo-Mejía y Albertó (2013) usaron 80 °C/90 min mostrando EB de 75,8 %. Al parecer, la inmersión del sustrato por 30 min genera baja productividad, mientras que la inmersión entre 60-90 min se observa un incremento positivo. Aunque la IAC es un método ampliamente utilizado en el cultivo de *Pleurotus* en países de América Latina y África, se deben considerar algunos inconvenientes reportados como un lavado de nutrientes en el proceso de preparación, lo que puede provocar una reducción en el rendimiento además de requerir gran cantidad de agua (Jaramillo-Mejía y Albertó, 2013; Bellettini *et al.*, 2019). En este trabajo encontramos que la IAC brindó un alto rendimiento, pero también se confirma una alta demanda de agua.

El tiempo de 48 h usado en nuestro estudio para la preparación de los sustratos por V de los tratamientos T4, T5 y T6 fue similar al tiempo de 47 h reportado por Morales y Sánchez (2017) para preparar sustratos autocalentados para el cultivo de *P. djamor*, *P. ostreatus* y *P. eryngii*. Sin embargo, la temperatura/tiempo a la que fueron sometidos los sustratos en nuestro experimento (Fig. 1b) difieren de lo reportado por Morales y Sánchez (2017) quienes emplearon temperaturas entre 60 y 70 °C durante al menos 6 h. Teniendo en cuenta la viabilidad de cultivar hongos del género *Pleurotus* en un sustrato sometido térmicamente entre 60 y 70 °C durante al menos 6 h, el proceso de preparación por V podría tener una duración total de 30 h, además, en lugar de suministrar calor durante 2 h empleando GLP como combustible se podría reducir a 1 h ya que la banda de confianza superior calculada a 95 % respecto al intervalo de predicción lo permite, disminuyendo el uso de GLP.

La humedad final de los sustratos preparados por IAC (69,6 a 72,9 %), fue similar a lo reportados por Jaramillo-Mejía y Albertó (2013) para el cultivo de *P. ostreatus* en paja de trigo, quienes alcanzaron una humedad del 70 %. La variable porcentaje de retención de humedad de los sustratos preparados por IAC pudo deberse a las características físicas de los sustratos, a las proporciones empleadas en las mezclas y al tiempo proporcionado para escurrir el exceso de agua (Jaramillo-Mejía y Albertó, 2013; Romero-Arenas *et al.*, 2018). La preparación de los sustratos por IAC sugiere un escaso control de la humedad final del sustrato mediante un simple escorrimento, por lo que previamente se ha recomendado emplear equipo adicional como una prensa hidráulica en el proceso para ajustar la humedad (Moda *et al.*, 2005). En los sustratos preparados por V la humedad final de los sustratos fue de 66,6 a 68,3, lo cual puede explicarse por el proceso de hidratación ajustada y porque los sustratos permanecieron dentro de bolsas de polietileno durante la preparación. La humedad de los sustratos por IAC y por V fue inferior a lo informado por Contreras *et al.* (2004), quienes en la preparación de rastrojo de maíz por inmersión en agua alcalina durante 48 h obtuvieron una humedad final de 76 %. Esto indica que un contacto directo del sustrato con el agua por un periodo prolongado de tiempo puede influir en una mayor absorción de humedad, lo cual no es recomendable en el cultivo de hongos ya que puede contribuir en la aparición de contaminación bacteriana (Contreras *et al.*, 2004) y una baja porosidad, limitando al intercambio de gases como oxígeno y dióxido de carbono (Patel *et al.*, 2009). La variación observada en el pH de los sustratos puede atribuirse a la adición de Ca(OH)<sub>2</sub> (Morales y Sánchez, 2017), a la actividad microbiana en el sustrato y a las condiciones de temperatura (Torres-Ruiz *et al.*, 2016). La adición de Ca(OH)<sub>2</sub> y los valores finales de pH de 7,7 a 8,4 en los sustratos fueron adecuados para el desarrollo y fructificación de *P. ostreatus*.

y han sido reportados como propicios para el desarrollo de hongos del género *Pleurotus* (Morales y Sánchez, 2017; Valenzuela-Cobos *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2023).

### Consumo de agua y GLP

Bajo las condiciones empleadas en este estudio, el consumo de agua para preparar 1 kg de sustrato por V fue menor al usado en la preparación por IAC (1,08 L versus 3,02 L). Esto se explica por las diferencias en el volumen del agua empleado en cada metodología (40,5 L en la preparación por V y 136 L en la preparación por IAC), lo que además tiene un impacto en consumo de GLP (3,3 kg y 5,4 kg de GLP para la preparación por V e IAC, respectivamente). Por lo que, la preparación de sustratos empleando un contenedor cilíndrico de metal de capacidad de 243 L en su máxima capacidad, sugiere que, la técnica por V aprovecha con mayor eficiencia el agua y energía en términos de consumo en comparación a IAC. Otras técnicas que buscan optimizar recursos en la preparación de sustratos para el cultivo de *Pleurotus* spp. se han reportado previamente, como el autocalentamiento, el cual no requiere una fuente externa de calor (Morales y Sánchez, 2017), el suministro de vapor de agua a 90 °C durante 1 h usando equipos industriales (Barrios-Espinoza *et al.*, 2009), y la esterilización en autoclave a 1,05 kg/cm<sup>2</sup> de presión, 121 °C durante 30-40 min (Roblero-Mejía *et al.*, 2021; Ejigu *et al.*, 2022). La técnica por vapor evaluada en este estudio representa un uso eficiente de los recursos agua y el GLP como fuente de energía, lo cual contribuiría a lo planteado en los Objetivos del Desarrollo Sostenible, garantizando la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, así como, el acceso a una

energía asequible, fiable, sostenible y moderada para todos (Naciones Unidas, 2018).

### Parámetros de producción

Los mayores valores de EB, TP y R de los tratamientos T1, T2 y T3 al igual que la TPyR del tratamiento T6 podría deberse a que estos sustratos proveen condiciones apropiadas que influyen en una mayor productividad (Tabla 3); estudios previos demostraron que una mayor productividad se relacionó con una mayor disponibilidad de nutrientes en cada sustrato evaluado, los cuales, el hongo aprovecha para su desarrollo y fructificación (Vega *et al.*, 2022) y a las condiciones físicas que la combinación de sustrato provee al hongo como la porosidad y retención de humedad que permiten una adecuada oxigenación (Patel *et al.*, 2009). Los parámetros productivos de los sustratos preparados por V fueron menores que en IAC, sin embargo, los mejores valores de la pendiente mostrados en V con respecto a IAC (Tabla 4), pudiera estar relacionado con la HS (66,6 a 68,3 %) inicial en que fue inoculado el hongo, ya que estas variables se correlacionaron de forma positiva y significativa ( $r_s = 0,53$ ;  $p < 0,05$ ), por lo que incrementar la humedad como en T1, T2 y T3 (Tabla 2), podría mejorar el desarrollo del hongo y una mayor productividad (Fig. 2) (Bellettini *et al.*, 2019). El T4 mostró menor NTE respecto a T1, T2 y T3 empero, en la variable PSTE fueron estadísticamente similares, lo que podría indicar que, aunque el número total de esporomas fue menor, estos presentaron mayor peso seco individual. El ciclo de producción observado de 45,8 a 51 días entre los tratamientos evaluados con humedad entre 66,6-72,9 %, fue menor a lo informado por Romero-Arenas *et al.* (2018)

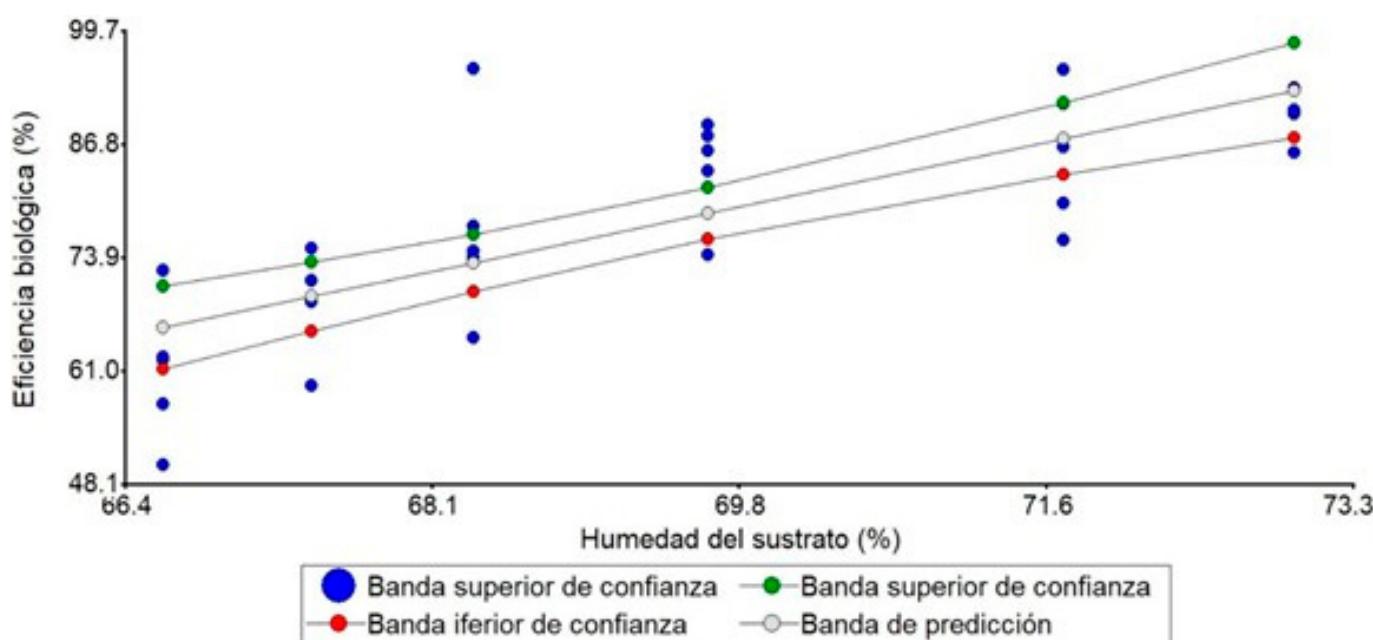


Figura 2. Tendencia de la productividad (eficiencia biológica %) de *P. ostreatus* con respecto a la humedad del sustrato donde se desarrolló el hongo.  $y = 4,24x - 216,74$ .  $R^2 = 0,62$ ,  $p < 0,0001$ .

**Tabla 3.** Indicadores de producción de la cepa IE115 *P. ostreatus*. EB: eficiencia biológica, TP: tasa de producción, R: rendimiento, PFTE: peso fresco total de esporomas, PSTE: peso seco total de esporomas, NTE: número total de esporomas y CP: ciclo de producción.

Tratamientos	T1= IAC, RM100	T2= IAC, RM100+T30	T3= IAC, RM50+T50	T4= V, RM100	T5= V, RM100+T30	T6= V, RM50+T50
EB (%)	84,16±5,9 <sup>ab</sup>	85,86±7,95 <sup>ab</sup>	90,56±2,95 <sup>a</sup>	60,98±8,13 <sup>d</sup>	69,12±5,91 <sup>cd</sup>	77,24±11,22 <sup>bc</sup>
TP (%/día)	1,8±0,12 <sup>a</sup>	1,71±0,3 <sup>a</sup>	1,9±0,06 <sup>a</sup>	1,34±0,22 <sup>c</sup>	1,44±0,06 <sup>bc</sup>	1,69±0,26 <sup>ab</sup>
R (%)	6,53±0,45 <sup>ab</sup>	6,96±0,64 <sup>a</sup>	7,2±0,23 <sup>a</sup>	5,86±0,78 <sup>b</sup>	5,84±0,49 <sup>b</sup>	6,87±0,99 <sup>a</sup>
PFTE (g)	255,2±17,9 <sup>a</sup>	243,2±22,52 <sup>a</sup>	244,8±7,98 <sup>a</sup>	203,6±27,15 <sup>b</sup>	225±19,26 <sup>ab</sup>	244,4±35,52 <sup>a</sup>
PSTE (g)	19,81±1,39 <sup>a</sup>	19,7±1,82 <sup>a</sup>	19,47±0,63 <sup>a</sup>	19,57±2,61 <sup>a</sup>	19±1,62 <sup>a</sup>	21,75±3,16 <sup>a</sup>
NTE	47±7,94 <sup>ab</sup>	57,8±14,53 <sup>ab</sup>	62,2±10,76 <sup>a</sup>	41,2±3,63 <sup>b</sup>	59,8±14,8 <sup>a</sup>	61,2±17,28 <sup>a</sup>
CP (Días)*	48,8±0,45 <sup>a</sup>	51±6,36 <sup>a</sup>	47,6±1,34 <sup>a</sup>	46±2,24 <sup>a</sup>	48±2,24 <sup>a</sup>	45,8±0,44 <sup>a</sup>

Media ± desviación estándar. Medias con diferente letra dentro de la fila son significativamente diferentes (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). IAC: inmersión en agua caliente. V: vapor. RM: rastrojo de maíz. T: tlazole. \*: prueba de Kruskal-Wallis.

en el cultivo de *P. ostreatus* con un CP de 73 días en sustrato tratado por IAC, por su parte, Jaramillo-Mejía y Alberto (2019), Ye *et al.* (2023) reportaron un CP de 66 días y Roblero-Mejía *et al.* (2021) un CP de 81,3 días en sustratos con humedad de 60-70 % y esterilizados en autoclave. Los menores valores de CP encontrados en este estudio con respecto a los estudios antes mencionados podrían deberse a las condiciones de humedad y el proceso de preparación de los sustratos (Bellettini *et al.*, 2019), lo que pudo permitir que el micelio del hongo colonizara los sustratos con menores restricciones (Sharma *et al.*, 2013). La correlación lineal positiva encontrada entre la HS y las variables EB, TP, R y el PFTE sugiere que las condiciones de preparación de los sustratos evaluadas en este estudio permiten que *P. ostreatus* haga un adecuado aprovechamiento de nutrientes. Sin embargo, la correlación negativa entre el pH y la EB, TP, PFTE, R y CP sugiere que valores menores o mayores de pH entre 7,7-8,4 podrían afectar la productividad de *Pleurotus*.

Los resultados mostraron mayor productividad de *P. ostreatus* en sustratos preparados por IAC, sin embargo, el uso de la técnica por V con la mezcla de RM y T en una proporción de 50 % permite alcanzar EB de 77,2 % con mejor uso de recursos como agua y energía, esto sugiere la viabilidad de la adopción de esta tecnología principalmente por productores en el medio rural (Aguilar-Ventura *et al.*, 2024), además, el cultivo de *Pleurotus* posee un amplio mosaico de residuos orgánicos que se pueden emplear como sustrato (Besufekad *et al.*, 2020), trayendo consigo beneficios como la obtención de alimentos para consumo humano, generación de ingresos económicos, diversifica las actividades agrícolas y contribución a la seguridad alimentaria de los pueblos (Huacash-Pale y Ocampo-Guzmán, 2021).

## CONCLUSIONES

La mezcla de RM50+T50 tratados por IAC y por V favorece positivamente la productividad de *P. ostreatus*. La metodología de V con modificaciones fue más eficiente que IAC en el uso de agua (1,08 L) y energía (GLP, 0,088 kg) para preparar 1 kg de sustrato (peso húmedo). Las condiciones de humedad (66,6-72,9 %) y pH (7,7-8,4) de los sustratos favorecieron el desarrollo y fructificación de *P. ostreatus*, aunque, en la preparación por V se puede tener mejor control de estos parámetros, lo cual puede ser clave en el éxito del cultivo en el manejo de enfermedades.

## PARTICIPACIÓN DE AUTORES

DAA-V: Desarrolló la metodología, realizó los análisis estadísticos redactó y aprobó el documento final. RS-L, NA-R, PZ-C, GM: Revisaron, editaron y aprobaron el documento final. RCL-H: Aprobó el documento final, conceptualizó y diseñó el experimento.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, por la beca otorgada (783900). Al Laboratorio de Biotecnología de Cultivo de Hongos Comestibles y Medicinales de la Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Orizaba-Córdoba, por la capacidad técnica y académica para la realización del estudio. Se agradece a los técnicos Ely Gutiérrez Dávila y Marcelino Villagrán Méndez por los equipos y materiales proporcionados.

**Tabla 4.** Coeficientes del modelo de regresión lineal de la producción obtenida en sustratos tratados por inmersión en agua caliente y por vapor. Prep de S: Preparación de sustrato, Mod de Reg: Modelo de Regresión, EB: eficiencia biológica, TP: tasa de producción, R: rendimiento, PFTE: peso fresco total de esporomas, PSTE: peso seco total de esporomas, NTE: número total de esporomas y CP: ciclo de producción.

Prep de S	Mod de Reg	EB (%)	TP (%/día)	R (%)	PFTE (g)	PSTE (g)	NTE	CP (Días)
Inmersión en agua caliente	Pendiente	0,12	0,00017	0,01	-0,22	-0,01	0,31	0,03
	Intercepto	83,6	1,76	6,54	253,68	19,84	47,44	47,78
	R <sup>2</sup>	0,86	0,20	1	0,74	0,90	0,98	0,08
	P-valor	0,2416	0,7068	0,0229	0,3385	0,2077	0,0786	0,8120
Vapor	Pendiente	0,32	0,01	0,02	0,81	0,04	0,42	0,00016
	Intercepto	60,56	1,31	5,70	202,79	19,08	42,92	46,56
	R <sup>2</sup>	0,99	0,88	0,63	0,99	0,45	0,89	0,00011
	P-valor	0,0725	0,2286	0,4193	0,0552	0,5321	0,2202	0,9792

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de interés que influyan en los resultados del presente artículo.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Ventura, D. A., Serna-Lagunes, R., Chen, J. y Llarena Hernández, R. C. (2024). Implicaciones biotecnológicas del cultivo de *Pleurotus* en la formación académica y la capacitación a productores de Las Montañas, Veracruz. *Bioagrociencias*, 17(1), 128-135. <http://doi.org/10.56369/BAC.5590>
- Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A. and Robledo, C. W. (2008). InfoStat software estadístico manual del usuario. Brujas. Recuperado el 8 de febrero del 2024 de <https://www.researchgate.net/publication/3198753>
- Barrios-Espinoza, B. M., Moreno Ruiz, L. y Sánchez, J. E. (2009). Composteo en cajones de madera como pretratamiento del sustrato para cultivar *Pleurotus ostreatus*. *Revista Mexicana de Micología*, 29, 51-59.
- Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maieves, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P.S., Júnior, A. M. and Ribani, R. H. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633-646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Besufekad, Y., Mekonnen, A., Girma, B., Daniel, R., Tassema, G., Melkamu, J., Asefa, M., Fikiru, T. and Denboba, L. (2020). Selection of appropriate substrate for production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Yeast and Fungal Research*, 11(1), 15-25. <https://doi.org/10.5897/jyfr2019.0187>
- Contreras, E. P., Sokolov, M., Mejía, G. and Sánchez, J. E. (2004). Soaking of substrate in alkaline water as a pretreatment for the cultivation of *Pleurotus ostreatus*. *Journal Horticultural Science & Biotechnology*, 79(2), 234-240. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511754>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.
- W. (2020). InfoStat. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado el 8 de febrero del 2024 de <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Muñoz, K., Casanova Guajardo, M., León Torres, C. A., Gil Ramírez, L. A., Bardales Vázquez, C. B. y Cabos Sánchez, J. (2019). Producción de *Pleurotus ostreatus* (Pleurotaceae) ICFC 153/99 cultivado sobre diferentes residuos lignocelulósicos. *Arnaldoa*, 26(3), 1177-1184. <https://journal.upao.edu.pe/index.php/Arnaldoa/article/view/1413>
- Dorr, E., Koegler, M., Gabrielle, B. and Aubry, C. (2021). Life cycle assessment of a circular, urban mushroom farm. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125668>
- Ejigu, N., Sitotaw, B., Girmay, S. and Assaye, H. (2022). Evaluation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) production using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biomass supplemented with agricultural wastes. *International Journal of Food Science*, 9289043, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/9289043>
- Huacash-Pale, S. y Ocampo Guzmán, A. (2021). El territorio y actores sociales del sistema de producción de hongo comestible (*Pleurotus ostreatus*, sp) en Aldama Chiapas. *Horizontes Territoriales*, 1(2), 1-25. <https://doi.org/10.31644/HT.01.02.2021.A4>
- Huerta, G., Martínez Carrera, D., Sánchez, J. E. y Leal Lara, H. (2009). Grupos de interesterilidad y productividad de cepas de *Pleurotus* de regiones tropicales y subtropicales de México. *Revista Mexicana de Micología*, 30, 35-42.
- Iossi, M. R., Valenzuela Cobos, J. D., Gea Alegria, F. J. and Cunha Zied, D. (2018). *Pleurotus* spp. cultivation on *Brachiaria* sp. straw treatment with alkaline water Oyster mushroom and substrate treatment. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(1), 64-67. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.06.003>
- Jaramillo-Mejía, S. and Albertó, E. (2013). Heat treatment of wheat straw by immersion in hot water decreases mushroom yield in *Pleurotus ostreatus*. *Revista Iberoamericana de Micología*, 30(2), 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2012.11.004>

- Jaramillo Mejía, S. y Albertó, E. (2019). Incremento de la productividad de *Pleurotus ostreatus* mediante el uso de inóculo como suplemento. *Scientia Fungorum*, 49, e1243. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1243>
- Moda, E. M., Horii, J. and Fillet Spoto, M. H. (2005). Edible mushroom *Pleurotus sajor-caju* production on washed and supplemented sugarcane bagasse. *Scientia Agricola*, 62(2), 127–132. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000200006>
- Morales, V. and Sánchez, J. E. (2017). Self-Heating Pasteurization of Substrates for Culinary-Medicinal Mushrooms Cultivation in Mexico. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 19(5), 477–484. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.v19.i5.90>
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas. Recuperado el 8 de febrero del 2024 de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>
- Nongthombam, J., Kumar, A., Ladli, Manikanta, B., Madhushekhar, M. and Patidar, S. (2021). A review on study of growth and cultivation of oyster mushroom. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22(5 and 6), 55–65.
- Patel, H., Gupte, A. and Gupte, S. (2009). Effect of different culture conditions and inducers on production of laccase by a basidiomycete fungal isolate *Pleurotus ostreatus* HP-1 under solid state fermentation. *BioResources*, 4(1), 268–284.
- Ríos-Ruiz, W. F., Valdez Nuñez, R. A. y Jiménez Flores, J. P. (2017). Aislamiento, propagación y crecimiento de hongos comestibles nativos en residuos agroindustriales. *Scientia Agropecuaria*, 8(4), 327–335.
- Roblero-Mejía, D. O., Aguilar Marcelino, L. y Sánchez J. E. (2021). Efecto de la variación del sustrato en la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp. *ScientiaFungorum*, 52, e1377. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1377>
- Romero-Arenas, O., Valencia De Ita, M. Á., Rivera Tapia, J. A., Tello Salgado, I., Villarreal-Espino-Barros, O. A. and Damián Huato, M. Á. (2018). Productive capacity of *Pleurotus ostreatus* using dehydrated alfalfa as supplement in different agricultural substrates. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15, 145–160.
- Sharma, S., Yadab, R. K. P. and Pokhrel, C. P. (2013). Growth and yield of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on different substrates. *Journal on New Biological Reports*, 2(1), 3–8.
- Tang, Z. X., Shi, L. E., Jiang, Z. B., Bai, X. L. and Ying, R. F. (2023). Calcium enrichment in edible mushrooms: a review. *Journal of Fungi*, 9(3), 338. <https://doi.org/10.3390/jof9030338>
- Torres-Ruiz, E., Sánchez, J. E., Guillén Navarro, G. K., Ramos Pérez, D. G. and Royse, D. J. (2016). Microbial promoters of mycelial growth, fruiting and production of *Pleurotus ostreatus*. *Sydowia*, 68(30), 151–161. <https://doi.org/10.12905/0380-sydowia68-2016-0151>
- Valenzuela-Cobos, J., Guevara Viejó, F., Cárdenas Cobo, J., Lazo, R., Noriega, D., Grijalva, A. and Garcés, F. (2021). Production of biomass and exopolysaccharides obtained from *Pleurotus* hybrid strains under different pHs to remove heavy metals in aquaculture effluents. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 25(2), 615–622. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2021.166248>
- Valencia de Ita, M. A., Castañeda Antonio, M. D., Huerta Lara, M. y Romero Arenas, O. (2018). Carrizo silvestre (*Arundo donax*) como sustrato alternativo en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Scientia Fungorum*, 48, 15–22. <https://doi.org/10.33885/sf.2018.48.1231>
- Vega, A., De León, J. A., Miranda, S. and Reyes S. M. (2022). Agro-industrial waste improves the nutritional and antioxidant profile of *Pleurotus djamor*. *Cleaner Waste Systems*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100018>
- Yang, W. J., Guo, F. L. and Wan, Z. J. (2013). Yield and size of oyster mushroom grown on rice/wheat straw basal substrate supplemented with cotton seed hull. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.02.006>
- Ye, D., Hu, Q., Bai, X., Zhang, W. and Guo, H. (2023). Increasing the value of *Phragmites australis* straw in a sustainable integrated agriculture model (SIAM) comprising edible mushroom cultivation and spent mushroom substrate compost. *Science of the Total Environment*, 869, 161807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161807>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis*. (5<sup>a</sup> ed.) Pearson.