

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Aprovechamiento de la Pulpa de Café (*Coffea arabica*) de la
Región Occidental de Guatemala en la Producción de *Pleurotus*
ostreatus

Trabajo de graduación presentado por María Guisselle Mont
López para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Química

Guatemala

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



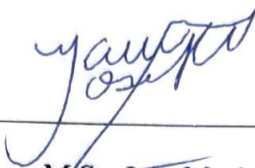
Aprovechamiento de la Pulpa de Café (*Coffea arabica*) de la
Región Occidental de Guatemala en la Producción de *Pleurotus*
ostreatus

Trabajo de graduación presentado por María Guisselle Mont
López para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería
Química

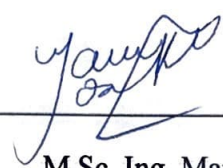
Guatemala

2025

Vo. Bo.

(f) 
M.Sc. Ing. María José Ramos

Tribunal examinador

(f) 
M.Sc. Ing. María José Ramos

(f) 
M.Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
MSc. & MBA Ing. Luis Ernesto Núñez González

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala 11 de diciembre de 2025

Prefacio

El objetivo de este trabajo de graduación es aprovechar la pulpa de café para el cultivo de setas comestibles. Este tema surgió del interés de darle un valor a este residuo de la producción de café, la cual es muy importante en el país. Transformarlo en un alimento que no solo permite reducir el impacto ambiental de su disposición, sino que también contribuye a la nutrición de las comunidades.

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional. En especial a mi papá, Otto Mont, por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional, siempre apoyándome y dándome su amor y respaldo, a pesar de la distancia. A mi mamá, Gissella López, por acompañarme y estar presente en cada etapa, ofreciéndome siempre su apoyo y amor. A mi hermano Romeo, por ser un ejemplo y un apoyo en mi formación profesional, y a mi hermana María Luz, por su motivación y cariño.

A mis amigas, que hicieron que estos cinco años de carrera fueran más bonitos; a pesar de los obstáculos, logramos celebrar cada logro. En especial a Emily Aldana, la primera amistad que formé en la universidad y que sigue presente incluso fuera de ella. También quiero agradecer a Diego Castillo, quien vivió conmigo la transición universitaria y me acompañó durante todo el proceso. Gracias por escucharme tantas veces, por estar presente en mis victorias y en mis derrotas, y por motivarme siempre a ser la mejor versión de mí.

Quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios, donde pude crecer como profesional. Al Departamento de Ingeniería Química, en especial al Ing. Zambrano, a quien le tengo una profunda admiración y respeto. Su apoyo y enseñanzas siempre retándonos a mejorar y preparándonos para salir al mundo sin miedo.

También quiero agradecer a la Ing. María José por todo su apoyo, sus consejos y su acompañamiento durante este trabajo de graduación, así como por la pasión con la que transmite sus conocimientos.

A la Ing. Carmen, por su constante disposición para resolver todas mis dudas y brindarme su ayuda cada vez que la necesité.

Al Ing. Luis Núñez, por su valiosa guía durante el trabajo de graduación y por las enseñanzas compartidas en sus cursos. Su experiencia y orientación durante este último año fueron fundamentales para comprender los retos reales de la industria y la importancia de estar preparada profesionalmente.

Finalmente, quiero agradecer a los técnicos del Laboratorio de Operaciones Unitarias por su colaboración y apoyo. Quienes me apoyaron tanto en proyectos de investigación, en el trabajo de graduación y en el laboratorio. Por su amabilidad, por resolver nuestras dudas y por ayudarnos a poner en práctica lo que aprendemos.

Índice

| | |
|--|------|
| Prefacio..... | v |
| Lista de cuadros | viii |
| Lista de figuras..... | xii |
| Resumen | xv |
| Abstract | xvi |
| I. Introducción | 1 |
| II. Antecedentes | 3 |
| III. Justificación | 6 |
| IV. Objetivos..... | 8 |
| 4.1. General | 8 |
| 4.2. Específicos..... | 8 |
| V. Marco teórico | 9 |
| 5.1. La industria del café en Guatemala | 9 |
| 5.2. Proceso de producción de café en Guatemala..... | 11 |
| 5.3. Pulpa de café..... | 12 |
| 5.4. Economía circular | 16 |
| 5.5. Introducción a la fungicultura..... | 19 |
| 5.6. Pleurotus ostreatus (hongo ostra)..... | 24 |
| 5.7. Sustratos lignocelulósicos..... | 28 |
| 5.8. Cultivo de Pleurotus ostreatus | 32 |
| 5.9. Balance de masa..... | 37 |
| 5.10. Balance de energía | 38 |
| 5.11. Diagrama de flujo | 39 |
| 5.12. Contaminantes comunes en el cultivo de hongos | 39 |
| 5.13. Prevención de contaminaciones en el cultivo de Pleurotus ostreatus | 40 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.14. | Manejo del sustrato de hongos gastado..... | 41 |
| VI. | Metodología..... | 44 |
| 6.1 | Equipos..... | 44 |
| 6.2 | Materiales..... | 44 |
| 6.3 | Reactivos..... | 44 |
| 6.4 | Procedimiento..... | 44 |
| VII. | Resultados..... | 51 |
| a. | Análisis fisicoquímico de los sustratos para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 51 |
| b. | Rendimiento de las mezclas de sustrato..... | 53 |
| c. | Comparación de los parámetros de rendimiento productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cada mezcla de sustrato..... | 56 |
| VIII. | Análisis de resultados..... | 62 |
| IX. | Conclusiones..... | 76 |
| X. | Recomendaciones..... | 77 |
| XI. | Referencias..... | 78 |
| XII. | Anexos..... | 88 |
| a) | Balances de masa y energía..... | 88 |
| b) | Datos de placa..... | 93 |
| c) | Datos originales..... | 94 |
| d) | Cálculo de muestra..... | 112 |
| e) | Análisis de error..... | 117 |
| f) | Datos calculados..... | 122 |
| g) | Imágenes de experimentación..... | 134 |
| XIII. | Glosario..... | 159 |

Lista de cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Características químicas de la pulpa de café de la especie <i>C. arábica</i> | 13 |
| Cuadro 2. Minerales en la pulpa de café..... | 14 |
| Cuadro 3. Compuestos orgánicos presentes en la pulpa de café | 14 |
| Cuadro 4. Constituyentes de paredes celulares y polisacáridos estructurales en la pulpa de café..... | 15 |
| Cuadro 5. Propiedades químicas del hongo <i>Pleurotus ostreatus</i> | 20 |
| Cuadro 6. Productos comerciales de hongos disponibles en Guatemala | 23 |
| Cuadro 7. Taxonomía de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 25 |
| Cuadro 8. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>) de la Región Occidental de Guatemala | 51 |
| Cuadro 9. Caracterización fisicoquímica de la paja | 52 |
| Cuadro 10. Rendimiento biológico (RB) promedio de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 53 |
| Cuadro 11. Análisis ANOVA de un factor para el parámetro de rendimiento biológico de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 53 |
| Cuadro 12. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la rendimiento biológico de <i>Pleurotus ostreatus</i> en distintas mezclas de sustrato..... | 54 |
| Cuadro 13. Resultados promedio de los parámetros de producción de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 56 |
| Cuadro 14. Parámetros temporales del ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 60 |
| Cuadro 15. Datos de la placa de la pesa eléctrica | 93 |
| Cuadro 16. Datos de la placa de la balanza de humedad..... | 93 |
| Cuadro 17. Datos de la placa de los sensores de temperatura y humedad..... | 93 |
| Cuadro 18. Datos de la placa de la estufa eléctrica | 94 |
| Cuadro 19. Datos de placa de la balanza digital | 94 |
| Cuadro 20. Análisis fisicoquímico de la pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>) de la Región Occidental de Guatemala de tres muestras representativas | 94 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 21. Análisis fisicoquímico de la paja de cuatro muestras representativas | 95 |
| Cuadro 22. Balance de masa general del proceso de esterilización de la pulpa de café como sustrato | 96 |
| Cuadro 23. Balance de masa general del proceso de esterilización de la paja como sustrato | 96 |
| Cuadro 24. Contenido de humedad de la pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>) antes y después de la esterilización..... | 97 |
| Cuadro 25. Contenido de humedad de la paja antes y después de la esterilización | 97 |
| Cuadro 26. Pesos y mezclas de sustratos en cubetas para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 97 |
| Cuadro 27. Fechas de inoculación y colonización del micelio en las diferentes mezclas de sustrato | 98 |
| Cuadro 28. Medición de altura y diámetro del sustrato húmedo en las cubetas al momento de la inoculación..... | 98 |
| Cuadro 29. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 100% pulpa de café..... | 99 |
| Cuadro 30. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 100% paja..... | 99 |
| Cuadro 31. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 50pulpa/50 paja | 100 |
| Cuadro 32. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 70 pulpa/30 paja | 100 |
| Cuadro 33. Temperatura del ambiente de cultivo | 101 |
| Cuadro 34. Humedad relativa del ambiente de cultivo..... | 103 |
| Cuadro 35. Datos originales de dimensiones morfológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cubetas con 100% pulpa | 105 |
| Cuadro 36. Datos originales de dimensiones morfológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cubetas con 100% paja | 106 |
| Cuadro 37. Datos originales de dimensiones morfológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cubetas con 70 pulpa/30 paja | 107 |
| Cuadro 38. Datos originales de dimensiones morfológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cubetas con 50 pulpa/50 paja | 108 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 39. Masas de <i>Pleurotus ostreatus</i> producidos en cubetas con 100% pulpa de café durante las oleadas de cultivo..... | 109 |
| Cuadro 40. Masas de <i>Pleurotus ostreatus</i> producidos en cubetas con 100% paja durante las oleadas de cultivo | 109 |
| Cuadro 41. Masas de <i>Pleurotus ostreatus</i> producidos en cubetas con 70 pulpa /30 paja durante las oleadas de cultivo..... | 110 |
| Cuadro 42. Masas de <i>Pleurotus ostreatus</i> producidos en cubetas con 50 pulpa/50 paja durante las oleadas de cultivo..... | 110 |
| Cuadro 43. Peso total de las cubetas después del ciclo productivo para diferentes mezclas de sustrato | 111 |
| Cuadro 44. Humedad del sustrato residual en las cubetas de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> con diferentes mezclas de sustrato | 111 |
| Cuadro 45. Entalpías estándar de formación de compuestos involucrados en la respiración aeróbica de la glucosa | 112 |
| Cuadro 46. Datos promedio de la humedad inicial y posterior a la esterilización de cada sustrato | 122 |
| Cuadro 47. Densidad aparente del sustrato húmedo..... | 123 |
| Cuadro 48. Resultados de la prueba Q de Dixon para la detección de valores atípicos en los parámetros del análisis físicoquímico de la paja como sustrato..... | 123 |
| Cuadro 49. Intervalo de tiempo entre oleadas de fructificación para las diferentes mezcla | 124 |
| Cuadro 50. Duración total del ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en cada cubeta para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 124 |
| Cuadro 51. Pesos de sustrato seco en cubetas para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 125 |
| Cuadro 52. Masas del sustrato final en cubetas con diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 125 |
| Cuadro 53. Rendimiento biológico y tasa de producción del cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en las distintas mezclas de sustrato por cubeta | 126 |
| Cuadro 54. Precosidad en días para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 126 |
| Cuadro 55. Dimensiones morfológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i> por oleada de cultivo para las diferentes mezclas de sustrato | 127 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 56. Biodegradación del sustrato del cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en las distintas mezclas de sustrato por cubeta | 127 |
| Cuadro 57. Energía metabólica liberada durante la etapa de fructificación de <i>Pleurotus ostreatus</i> a partir de la masa de <i>CO2</i> generada por cubeta | 128 |
| Cuadro 58. Parámetros estadísticos de la rendimiento biológico (EB) de <i>Pleurotus ostreatus</i> en las cuatro mezclas de sustrato..... | 128 |
| Cuadro 59. Análisis ANOVA de la duración total del ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 129 |
| Cuadro 60. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la duración total del ciclo productivo | 129 |
| Cuadro 61. Análisis ANOVA de la tasa de producción en diferentes mezclas para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 130 |
| Cuadro 62. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la tasa de producción..... | 130 |
| Cuadro 63. Análisis ANOVA de la tasa de biodegradación del sustrato en diferentes mezclas para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 131 |
| Cuadro 64. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la tasa de biodegradación del sustrato..... | 131 |
| Cuadro 65. Cantidad de insumos utilizados en el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato..... | 132 |
| Cuadro 66. Costos asociados a los insumos utilizados en el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 132 |
| Cuadro 67.Requerimientos energéticos del proceso de esterilización del sustrato con pulpa de café y paja..... | 133 |
| Cuadro 68. Composición fisicoquímica de la mezcla 70 % pulpa de café / 30 % paja (base seca) | 133 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de café 2023-2024..... | 10 |
| Figura 2. Estructura interna del grano de café | 10 |
| Figura 3. Diagrama del proceso de beneficio del café y subproductos generados..... | 11 |
| Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del proceso de producción de café..... | 12 |
| Figura 5. Acumulación de pulpa de café sin tratamiento adecuado | 16 |
| Figura 6. Valor nutricional del hongo seta (%) en comparación con otros alimentos | 20 |
| Figura 7. Productos de hongos comestibles disponibles en supermercados de Guatemala | 24 |
| Figura 8. Partes del <i>Pleurotus ostreatus</i> | 25 |
| Figura 9. Ciclo de vida de un hongo..... | 27 |
| Figura 10. Proceso de cultivo de hongos comestibles | 32 |
| Figura 11. Ciclo de producción de hongos y compuestos bioactivos del sustrato de hongos gastado y principales aplicaciones..... | 41 |
| Figura 12. Ejemplos de aplicaciones del micelio gastado | 43 |
| Figura 13. Detalle de cubeta perforada para el cultivo de hongos | 46 |
| Figura 14. Control de la temperatura promedio durante el periodo experimental | 48 |
| Figura 15. Control de la humedad relativa promedio del ambiente durante el periodo experimental..... | 48 |
| Figura 16. Balance de masa y energía del cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> con diferentes mezclas de sustrato | 55 |
| Figura 17. Comparación de la rendimiento biológico de <i>Pleurotus ostreatus</i> en distintas mezclas de sustrato | 57 |
| Figura 18. Comparación de la tasa de producción (Tp) de <i>Pleurotus ostreatus</i> en distintas mezclas de sustrato | 58 |
| Figura 19. Comparación de la tasa de biodegradación del sustrato (Bs) en diferentes mezclas para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 59 |
| Figura 20. Comparación de los parámetros temporales del ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en diferentes mezclas de sustrato | 61 |

| | |
|--|-----|
| Figura 21. Balance de masa y energía general del proceso del cultivo de <i>P. ostreatus</i> | 88 |
| Figura 22. Balance de masa experimental para la mezcla 100% pulpa de café..... | 89 |
| Figura 23. Balance de masa experimental para la mezcla 100% paja | 90 |
| Figura 24. Balance de masa experimental para la mezcla 70% pulpa de café / 30% paja | 91 |
| Figura 25. Balance de masa experimental para la mezcla 50% pulpa de café / 50% paja | 92 |
| Figura 26. Valores críticos para el coeficiente de rechazo Q con 99% de confianza..... | 122 |
| Figura 27. Proceso de despulpado de café (<i>Coffea arabica</i>) por vía húmeda para la obtención de pulpa utilizada como sustrato | 134 |
| Figura 28. Esterilización de los sustratos por inmersión en agua caliente | 135 |
| Figura 29. Sustratos esterilizados para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> : paja (izquierda) y pulpa de café (derecha) | 135 |
| Figura 30 Inoculación del micelio en sus diferentes combinaciones de sustrato | 136 |
| Figura 31. Proceso de incubación de las diferentes mezclas de sustrato después de 7 días | 137 |
| Figura 32. Montaje experimental durante la etapa de fructificación de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 138 |
| Figura 33. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 70% pulpa y 30% paja | 139 |
| Figura 34. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 70% pulpa y 30% paja | 140 |
| Figura 35. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 70% pulpa y 30% paja..... | 141 |
| Figura 36. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% paja..... | 142 |
| Figura 37. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% paja..... | 143 |
| Figura 38. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% paja | 144 |
| Figura 39. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% pulpa de café..... | 145 |

| | |
|---|-----|
| Figura 40. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% pulpa de café..... | 146 |
| Figura 41. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% pulpa de café..... | 147 |
| Figura 42. Ciclo de vida de la cuarta oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% pulpa de café..... | 148 |
| Figura 43. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 50% pulpa y 50% paja | 149 |
| Figura 44. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 50% pulpa y 50% paja | 150 |
| Figura 45. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> en 50% pulpa y 50% paja..... | 151 |
| Figura 46. Indicadores de agotamiento del sustrato en la cuarta oleada del cultivo con mezcla 70 % pulpa/30 % paja..... | 152 |
| Figura 47. Indicadores de agotamiento del sustrato en la quinta oleada del cultivo con mezcla 100 % pulpa de café | 152 |
| Figura 48. Indicadores de agotamiento del sustrato en la tercera oleada del cultivo con mezcla 50 % pulpa/50 % paja..... | 153 |
| Figura 49. Indicadores de agotamiento del sustrato en la tercera oleada del cultivo con mezcla 100 % paja | 153 |
| Figura 50. Estado final del sustrato residual en las cubetas tras completar el ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> , en sus diferentes combinaciones de sustrato | 154 |
| Figura 51. Medición de la humedad del sustrato residual tras el ciclo productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 155 |
| Figura 52. Prueba preliminar de prensado y secado del sustrato residual poscosecha de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 155 |
| Figura 53. Análisis fisicoquímico del sustrato de pulpa de café para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 156 |
| Figura 54. Análisis fisicoquímico de tres muestras representativas del sustrato de paja para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 157 |
| Figura 55. Análisis fisicoquímico de una muestra del sustrato de paja para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> | 158 |

Resumen

Este trabajo evaluó el aprovechamiento de la pulpa de café (*Coffea arabica*) proveniente de la región Occidental de Guatemala como sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, para proponer una alternativa sostenible para la valorización de un residuo agroindustrial. Se realizó la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café y de la paja de trigo, considerando que *P. ostreatus* requiere fuente de carbono y un pH ligeramente ácido a neutro. La pulpa presentó una relación C/N de 28.15, un pH de 6.78 y un contenido de nitrógeno de 1.80 % (m/m), mientras que la paja mostró una relación C/N de 61.33, un pH de 8.47 y un contenido de nitrógeno de 0.81 % (m/m). Previo al cultivo, los sustratos se sometieron a esterilización térmica por inmersión en agua para reducir la carga microbiana e hidratarlo favoreciendo la inoculación y la colonización micelial frente a microorganismos competidores. Posteriormente, se elaboraron cuatro mezclas: 100 % pulpa, 100 % paja, 70 % pulpa / 30 % paja y 50 % pulpa / 50 % paja.

El análisis de varianza con prueba de Tukey permitió identificar que la mezcla 70 % pulpa / 30 % paja presentó los valores más altos en los parámetros productivos, con un rendimiento biológico de 1.36 ± 0.053 , una tasa de producción de $2.61 \pm 0.053 \left(\frac{\%}{\text{día}} \right)$, una tasa de biodegradación de $56.50 \pm 0.026\%$ y 15 días de precocidad. Al finalizar el cultivo, se obtuvo un sustrato residual con propiedades físicas modificadas por la red estructural de hifas del micelio, permitiendo su aprovechamiento posterior dentro de un enfoque de economía circular.

Palabras clave: pulpa de café, *Pleurotus ostreatus*, rendimiento biológico, cultivo, residuos.

Abstract

This study evaluated the use of coffee pulp (*Coffea arabica*) from the western region of Guatemala as a substrate for growing *Pleurotus ostreatus*, in order to propose a sustainable alternative for valorizing an agro-industrial residue. The physicochemical characterization of coffee pulp and wheat straw was carried out, considering that *P. ostreatus* requires a carbon source and a slightly acidic to neutral pH. The pulp had a C/N ratio of 28.15, a pH of 6.78, and a nitrogen content of 1.80 % (w/w), while the straw showed a C/N ratio of 61.33, a pH of 8.47, and a nitrogen content of 0.81 % (w/w). Prior to cultivation, the substrates were subjected to thermal sterilization by immersion in water to reduce the microbial load and hydrate them, thereby promoting inoculation and mycelial colonization over competing microorganisms. Subsequently, four mixtures were prepared: 100% pulp, 100% straw, 70% pulp / 30% straw, and 50% pulp / 50% straw.

Analysis of variance with Tukey's test revealed that the 70% pulp / 30% straw mixture exhibited the highest values for the productive parameters, with a biological efficiency of 1.36 ± 0.053 , a production rate of 2.61 ± 0.053 (%/day), a biodegradation rate of $56.50 \pm 0.026\%$, and 15 days to reach maturity. At the end of the cultivation, a residual substrate was obtained with physical properties modified by the mycelial hyphal network, allowing its subsequent reuse within a circular economy approach.

Keywords: coffee pulp, *Pleurotus ostreatus*, biological yield, cultivation, waste.

I. Introducción

El café se destaca como una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial. Este reconocimiento no solo se atribuye a sus características organolépticas y efectos estimulantes, sino por la cultura y su importancia económica en diversas regiones productoras. En la actualidad, la segunda bebida más popular después del agua, con más de 500 mil millones de tazas consumidas anualmente (Gil-Gómez et al., 2024).

No obstante, la industria cafetalera produce un volumen considerable de residuos a lo largo de su cadena de producción. En particular, durante la etapa de despulpado del fruto de café, cuando ya se obtiene el grano, se calcula que por cada kilogramo de cerezas recolectadas se generan aproximadamente 0.49 kg de este desecho (Gil-Gómez et al., 2024). Considerando que Guatemala produce 3.42 millones de sacos de 60 kg de café, equivalentes a cerca del 2 % de la producción mundial (USDA Foreign Agriculture Service, 2025) y se estima que anualmente se generan más de 1.8 millones de toneladas de residuos de café en el país. En Guatemala, el café constituye una fuente importante de ingresos para muchos hogares, con 3,559 productores registrados (Anacafé, 2024). Sin embargo, gran parte de estos residuos se maneja actualmente bajo un modelo lineal, ya que suelen ser enterrados o incinerados, lo que provoca la emisión de gases contaminantes y la degradación del suelo. Esta situación resulta contradictoria ya que el café es uno de los principales productos de exportación del país y se debería impulsar la transición hacia un modelo de economía circular que permita aprovechar estos subproductos en aplicaciones sostenibles, lo que reduciría su impacto ambiental y generaría un valor agregado crucial para la cadena productiva.

Aun cuando la pulpa de café ha sido objeto de investigación para su utilización en infusiones, compostaje, forraje para ganado, extracción de compuestos como cafeína y ácidos orgánicos para uso cosmético, fabricación de papel e incluso biocombustibles, el mundo enfrenta una crisis alimentaria en aumento, impulsada por factores como el cambio climático, la sobreexplotación de recursos naturales y los sistemas de producción ineficientes. Entre ellos, la ganadería representa una de las actividades con mayor huella ambiental, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la elevada demanda de agua y tierra. Adicionalmente Guatemala enfrenta uno de sus mayores retos de salud pública: la desnutrición crónica, que afecta aproximadamente al 46 % de los niños menores de cinco años, ubicando al país con la tasa más alta de retraso en el crecimiento infantil en América Latina y el Caribe, y el sexto a nivel mundial (Gatica-Domínguez et al., 2019). Esto ha impulsado la exploración de alternativas sostenibles, donde se aprovechen recursos locales en este caso, un desecho para generar alimento. Una opción particularmente prometedora es la utilización de la pulpa de café como sustrato para el cultivo de hongos comestibles, como *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra).

Esta alternativa no solo aprovecha un residuo agroindustrial, sino que también permite la producción de un alimento con elevado valor nutricional, bajo costo de producción y potencial de escalabilidad. El *Pleurotus ostreatus* destaca por su aporte proteico: puede alcanzar hasta 23.29 g de proteína por cada 100 g en peso seco, con un

perfil de aminoácidos esenciales equilibrado. Además, constituye una fuente importante de vitaminas del complejo B, minerales como hierro, zinc y potasio, fibra dietética y compuestos bioactivos, lo que lo convierte en una alternativa más saludable y sostenible que, al mismo tiempo, contribuye al aprovechamiento de residuos agrícolas y a la seguridad alimentaria. En contraste, la carne de res cruda contiene entre 18 a 23 g de proteína por cada 100 g en base húmeda, pero con un contenido considerablemente mayor de grasas y colesterol (Guo et al., 2024).

El presente trabajo tiene como objetivo aprovechar la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala como sustrato para el cultivo de setas comestibles *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra), como propuesta de una alternativa sostenible en la gestión de este residuo agroindustrial.

II. Antecedentes

El reino Fungi constituye uno de los grupos de organismos más diversos y ecológicamente cruciales del planeta. Más allá de su rol fundamental en los ecosistemas, los hongos han formado parte de la dieta y la medicina humana desde tiempos ancestrales. En la actualidad, su alto contenido en proteínas, fibra, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, unido a su bajo contenido calórico y de grasas, los posiciona como un alimento funcional creciente (Boa, 2004).

En Guatemala, el consumo de hongos, aunque no es masivo, combina tradición y modernidad. Por un lado, persiste la práctica ancestral de recolectar especies silvestres en bosques de regiones altas, especialmente durante la temporada de lluvias. Morales, Bran y Cáceres (2010) documentaron 83 especies de hongos comestibles de uso tradicional en distintas regiones del país entre 1948 y 2006. Especies muy apreciadas por su sabor como *Amanita caesarea* (conocido localmente como "hongo de San Juan"), *Lactarius deliciosus* ("shara amarilla") y el llamativo *Lactarius indigo* ("shara azul"). Sin embargo, esta práctica conlleva riesgos significativos debido a la presencia de especies tóxicas mortales que pueden confundirse fácilmente con las comestibles, lo que ha impulsado el interés en el cultivo controlado de hongos como una alternativa más segura y confiable para el consumo humano.

En la actualidad, el mercado de hongos comestibles ha mostrado una diversificación reciente en las cadenas de supermercados. Entre las marcas más comunes destacan Agrícola Grotto y La Carreta, esta última reconocida por la producción y distribución de frutas y vegetales, que recientemente ha incorporado hongos dentro de su oferta. Asimismo, existen otras plantas productoras como la Planta Productora Ocox y el Invernadero Santa Rita, registradas oficialmente, aunque con información más limitada sobre su distribución (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala [MEM], 2025).

Durante varios años, los hongos más presentes en supermercados fueron principalmente el champiñón de París (*Agaricus bisporus*) y el Portobelo, pero en la actualidad se observa también la incorporación de especies como *Pleurotus ostreatus*, *Crimini*, *Cardo* y *Shiitake*. Por otro lado, cooperativas como COINPU RL han impulsado la producción y venta de *Pleurotus spp.* frescos, en escabeche, así como la venta de micelio, lo que ha permitido diversificar el acceso al hongo ostra y fortalecer a pequeños productores locales, aunque su comercialización se concentra sobre todo en ferias y mercados locales más que en cadenas de supermercados. De manera complementaria, el MAGA, a través de sus centros de aprendizaje rural, ha promovido la capacitación comunitaria en diferentes municipios del país (Ramirez, 2025)

El cultivo de *Pleurotus ostreatus* es altamente adaptable a crecer en desechos agroindustriales, lo que representa una oportunidad valiosa para Guatemala de impulsar un modelo de economía circular, aprovechando subproductos como la pulpa de café para generar alimentos sostenibles y de alto valor nutricional. En el estudio de González et al. (2020), se realizó una caracterización fisicoquímica de la pulpa de café (*Coffea arabica*) para identificar posibles aplicaciones de esta. El análisis incluyó parámetros como humedad, pH, sólidos solubles, fenoles totales, capacidad antioxidante, proteína, grasa,

fibra, cafeína y cenizas. También se cuantificaron macro y micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na, B, Cu, Fe, Mn, Zn) y se verificó la presencia de materia orgánica. Lo que la convierte en un material potencialmente útil en la industria alimentaria, biotecnológica y agrícola.

Ahora bien una de las inquietudes iniciales al optar por la pulpa de café como sustrato para *Pleurotus ostreatus* fue la presencia de cafeína, debido a que su degradación puede resultar compleja para el hongo, lo que podría afectar su desarrollo y la calidad del producto final. En el estudio de Dissasa (2022) demostró que el micelio de *Pleurotus ostreatus* es capaz de degradar eficazmente compuestos lignocelulósicos como la celulosa, hemicelulosa, debido a su capacidad para producir enzimas específicas que descomponen estos compuestos. Esta característica permite adaptarse a diferentes tipos de sustratos, además, la presencia de azúcares en la pulpa de café favorece la nutrición del hongo y contribuye a su capacidad degradativa, por lo que no se observan efectos negativos significativos en el micelio. Por lo tanto, se consideró viable continuar con este sustrato, no solo por su riqueza en compuestos orgánicos, sino también por su potencial para valorizar residuos agroindustriales.

En el estudio de Risal et al. (2023), se estudiaron tres métodos comunes de empaquetado del sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*: botellas, bolsas y cubos de 5 galones. Aunque el método de bolsas resultó ser el más eficiente en términos de producción de hongos, el método de cubetas o cubos de plástico mostró un rendimiento biológico similar, además tiene una menor tasa de contaminación y son reutilizables siendo aplicadas en cultivos en pequeña y mediana escala. En la investigación, se optó por utilizar cubetas perforadas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, lo que permitió utilizar una mayor cantidad de sustrato y simular una producción a pequeña escala. Este método puede ser replicable en fincas mediante la creación de invernaderos, lo que permitiría escalar la producción de acuerdo con la capacidad de las cubetas seleccionadas y adaptarlo a las condiciones de cada finca.

Además, se tomó en cuenta lo reportado por Mendoza (2020), quien evaluó el uso de pulpa de café y viruta de bolaina blanca como sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus*, con tres tratamientos: viruta de bolaina, una mezcla 50:50 de pulpa de café y viruta, y solo pulpa de café. Los resultados mostraron que la mezcla 50:50 obtuvo la mejor rendimiento biológico (96.5%). A partir de ello, en esta investigación se decidió emplear mezclas de pulpa de café con un sustrato que compartiera características similares a la viruta, como su buena aireación que favorece la colonización del micelio y su capacidad para retener agua, por esta razón, se eligió la paja como sustrato complementario.

Bellettini et al. (2016) ofrecen una visión detallada de los factores internos y externos que influyen en el cultivo de *Pleurotus spp.*, considerando tanto las propiedades del sustrato como las condiciones ambientales. Recomiendan utilizar partículas de 2–5 cm para asegurar una adecuada aireación y controlar factores climáticos clave: mantener la humedad relativa entre 60 y 75 % durante la incubación y aumentarla a 85–95 % en la fase de fructificación para favorecer la formación de primordios. En cuanto a la temperatura, sugieren un rango de 23–28 °C durante la incubación y de 20–25 °C en la sala de cultivo tras la colonización; además, en caso de ausencia de fructificación, proponen un “shock

frío” de 24–48 h a 10–16 °C para inducir la formación de primordios. Con base en estas recomendaciones, el espacio de cultivo se acondicionó considerando temperatura, humedad, luz y ventilación. Asimismo, el tamaño de partícula de la pulpa de café se encontraba naturalmente dentro del rango sugerido, por lo que no fue necesario aplicar un pretratamiento adicional. Por otra parte, Zárate (2015) estableció indicadores productivos como la rendimiento biológico (EB), la tasa de producción (Tp), la precocidad y la biodegradación del sustrato (Bs), los cuales son esenciales para describir la capacidad del hongo de colonizar el sustrato, transformar la materia prima y generar biomasa comercializable. En esta investigación, dichos parámetros se utilizaron como base metodológica para comparar el desempeño de las distintas mezclas de pulpa de café y paja, y para demostrar su potencial como estrategia de aprovechamiento de residuos agroindustriales.

III. Justificación

Las cadenas de suministro alimentarias enfrentan crecientes desafíos debido a la competencia por recursos naturales como tierra, agua y energía. Según la FAO et al. (2025), se prevé que la demanda mundial de alimentos aumente más del 60% para 2050, ejerciendo presión adicional sobre sistemas ya sobreexplotados como la ganadería intensiva. Este sector es responsable del 14.5% de las emisiones globales de GEI, destacando el metano, con un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el del dióxido de carbono. (Gerber et al., 2013). Esta situación es especialmente relevante en países como Guatemala, donde la desnutrición crónica afecta al 46.5% de los niños menores de cinco años (UNICEF, 2024), limitando el desarrollo humano y perpetuando ciclos de pobreza. Ante este escenario, es necesario impulsar alternativas alimentarias alternativas alimentarias nutritivas y de bajo impacto ambiental, contribuyendo a economía circular y alinearse con los ODS 2 (Hambre Cero) y ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).

Una alternativa frente a estos retos es el cultivo de hongos comestibles, en particular *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra). Combina un alto contenido proteico (20–30 % en base seca), fibra dietética, vitaminas del complejo B y minerales. Además, los hongos pueden producirse en ciclos más cortos, con un consumo reducido de agua y mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales como sustratos (Effiong et al., 2024).

En este sentido, en Guatemala, el café constituye uno de los productos agroindustriales más relevantes. Según la Asociación Nacional del Café (Anacafé, 2024), durante el último año de producción se exportaron 4.08 millones de quintales, generando divisas por 898,796,996 dólares. De acuerdo con el Banco de Guatemala (Banguat, 2025), las exportaciones de café registraron un crecimiento anual del 61.1 % entre julio de 2024 y julio de 2025, posicionando al café como el principal producto agroindustrial de exportación y el segundo en importancia dentro del total de exportaciones nacionales.

Sin embargo, la industria genera volúmenes de residuos, entre ellos el subproducto del despulpado, que representa cerca del 40 % del peso total del fruto. Su disposición más común consiste en desecharlo o incinerarlo, prácticas que ocasionan impactos ambientales como la acidificación del suelo, la generación de olores desagradables y la proliferación de plagas (Navarro, 2023). La Guía Ambiental para el sector cafetalero en Guatemala ha enfocado el aprovechamiento de la pulpa de café principalmente en su uso como compostaje o como abono para el cultivo de café u otros cultivos. No obstante, no especifica parámetros técnicos sobre la composición de la pulpa, ni distingue entre variedades de café, regiones productoras o métodos de procesamiento, lo que limita su aplicación práctica. En una de sus secciones, se señala que la pulpa es un material lignocelulósico con alto contenido de compuestos orgánicos, lo que representa una oportunidad de aprovechamiento en el cultivo de hongos comestibles como *Pleurotus ostreatus*. Este uso permitiría no solo diversificar las actividades en las fincas, sino también generar un alimento proteico para el consumo local y la comercialización (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2023).

Si bien en otros países se ha investigado el uso de la pulpa de café como sustrato en el cultivo de hongos comestibles, dichos estudios se han desarrollado bajo condiciones específicas y con variedades particulares de café. En Guatemala, la caficultura se caracteriza por una alta diversidad de variedades y regiones productoras, lo que influye en la composición de la pulpa. A pesar de la relevancia de este sector productivo, no se han realizado investigaciones que documenten de manera técnica las características de la pulpa ni su aplicación en el cultivo de hongos. La información disponible proviene principalmente de iniciativas de cooperativas y proyectos comunitarios, los cuales se han enfocado en el uso de materiales tradicionales como sustratos como la paja, sin estudios que respalden técnicamente el aprovechamiento de residuos como la pulpa.

En este trabajo se presenta la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la región Occidental de Guatemala y de la paja. Con ambos se elaboraron diferentes mezclas en distintas proporciones, en las cuales se determinaron parámetros productivos como el rendimiento biológico, la tasa de producción y la tasa de biodegradación, así como el parámetro temporal de precocidad. De esta manera, este trabajo proporciona información sobre el aprovechamiento de la pulpa de café en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, constituyendo un aporte para la gestión sostenible de este residuo agroindustrial.

IV. Objetivos

4.1. General

Aprovechar la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala como sustrato para el cultivo de setas comestibles *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra), como propuesta de una alternativa sostenible en la gestión de este residuo agroindustrial.

4.2. Específicos

1. Caracterizar la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala y paja, mediante análisis fisicoquímico, para determinar su capacidad como sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*.
2. Desarrollar cuatro mezclas de sustrato utilizando pulpa de café (*Coffea arabica*) y paja en las siguientes proporciones: 100% pulpa de café, 100% paja, 50/50 (pulpa de café/paja) y 70/30 (pulpa de café/paja), y así identificar la combinación con mayor rendimiento biológico usando balance de masa.
3. Determinar el rendimiento biológico, la tasa de producción, la tasa de biodegradación del sustrato y la precocidad del ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus* en cada una de las mezclas de sustrato para hacer un diagrama comparativo entre ellos con su balance de masa respectivo.

V. Marco teórico

5.1. La industria del café en Guatemala

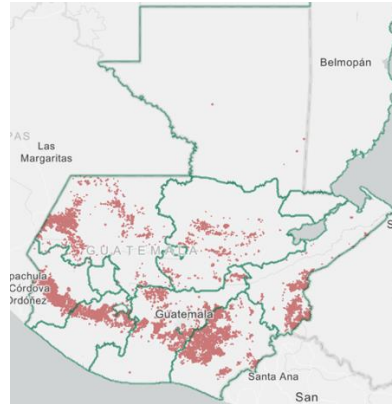
a. Historia e importancia del café en Guatemala

El café se destaca como uno de los cultivos agrícolas predominantes a escala global y ejerce una influencia significativa en el comercio internacional de numerosas naciones, constituyendo el fundamento para la diversificación de las actividades comerciales en múltiples regiones. En Guatemala, se introdujeron las primeras matas de este cultivo alrededor del siglo XVIII, aproximadamente en 1700, por medio de sacerdotes españoles, sin ningún fin comercial. Posteriormente, tras la invención de los tintes sintéticos, se dejó de exportar la “cochinilla”, lo que permitió que el cultivo del café se desarrollara para la producción comercial alrededor de 1859. Desde entonces, las plantaciones se extendieron por todo el país. El gobierno ofreció incentivos a los caficultores, y el producto, en su totalidad, se exportaba a Europa, convirtiéndose en uno de los pilares de la economía (Berger, 2003).

Las altitudes de las zonas cafetaleras de Guatemala varían entre los 1,000 y 2,000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). En particular, Huehuetenango, una región montañosa sin presencia de volcanes, se caracteriza por su clima templado y por el predominio del sistema de beneficio húmedo. Estas condiciones han sido reconocidas por contribuir a la alta calidad del café producido en la región, caracterizado por una acidez brillante. Los cafés de Huehuetenango suelen presentar notas dulces y afrutadas, con cuerpo balanceado y un menor contenido relativo de cafeína en comparación con otras regiones, lo que los posiciona como cafés de especialidad altamente valorados en el mercado internacional. Esta diversidad de perfiles ha favorecido que el café guatemalteco, y particularmente el de Huehuetenango, se consolide como un producto emblemático en las exportaciones del país, con una demanda creciente en nichos de consumidores que buscan calidad diferenciada (Molina, 2017).

Actualmente, el ciclo cafetalero en Guatemala va de diciembre a mayo del año siguiente. Se cultivan principalmente las especies *Coffea arabica* en zonas altas y *Coffea canephora* en áreas con menor altitud, además de otras variedades importantes como Bourbon, Pacamara, Caturra, Geisha, SL28 y SL34, que son reconocidas por su perfil de sabor y notas aumentado la diversidad del café guatemalteco. Sin embargo, la falta de tecnología adecuada ha provocado crisis en el sector a lo largo de los años. En 2018, Guatemala representó solo el 2.4% de la producción mundial de café, una disminución frente al 4.6% del año anterior, lo que resalta la necesidad urgente de actualizar y optimizar este sector para fortalecer la economía del país y mejorar su competitividad en el mercado global (Juárez, 2018).

Figura 1. Mapa de café 2023-2024

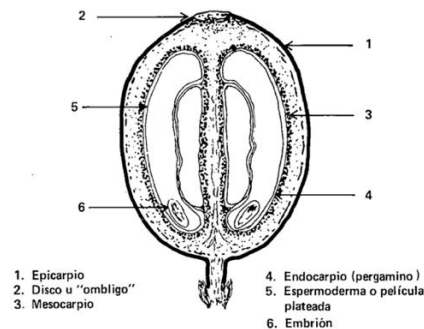


Nota. ArcGIS Dashboards, 2024.

Sin embargo, según la Asociación Nacional del Café (Anacafé, 2021), Guatemala se posiciona como el quinto mayor productor global de café arábica y es uno de los países que ha incrementado su producción durante el periodo 2020/21, documentando un incremento del 13.7%. Únicamente en 2023, este producto emergió como el segundo producto agroindustrial de mayor importancia, generando ingresos por exportaciones de 1,891,815.5 miles de dólares (Banco de Guatemala, 2023). Esta tendencia se mantuvo en 2024, donde el café sigue siendo el segundo producto más importante dentro del total de exportaciones. Este hecho es de vital importancia y, en el presente, la Asociación Nacional del Café (Anacafé) ha implementado diversos programas con el propósito de promover una caficultura más lucrativa y sostenible. A pesar de que el procedimiento es conocido y extensamente utilizado, aún afronta desafíos en cuanto a modernización y sostenibilidad.

b. Estructura del grano de café

Figura 2. Estructura interna del grano de café



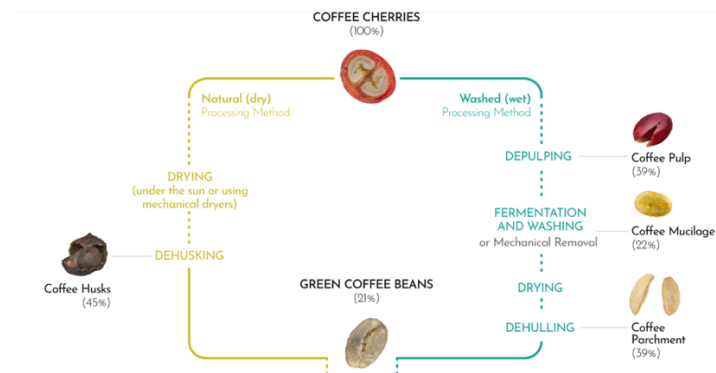
Nota. Braham y Bressani, 1978, p. 10.

El grano del café, como se ve en la Figura 2, la estructura interna abarca varias capas que recubren las semillas. El epicarpio (1) es la piel exterior que se vuelve roja cuando está madura. El mesocarpio (3), o pulpa, es la parte blanda aproximadamente de 1 pulgada de espesor. El disco (2) une la parte externa e interna del mesocarpio. La espermoderma (5)

es la llamada piel plateada cubre los granos de café y se cubre por la capa protectora dura, también conocido como endocarpio o pergamino es la que encierra las semillas y se endurece cuando pierde humedad. El embrión (6) se encuentra dentro de la semilla, necesaria para que una planta comience a crecer (Braham y Bressani, 1978).

5.2. Proceso de producción de café en Guatemala

Figura 3. Diagrama del proceso de beneficio del café y subproductos generados



Nota. OIC 2024, p. 16.

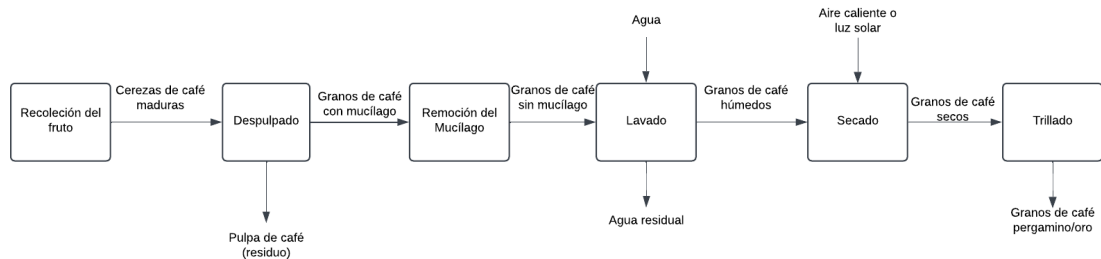
En la Figura 3 se puede observar el proceso de producción del café, que da inicio con la recolección manual de las cerezas maduras, las cuales tienen un color rojo intenso. El fruto interno está compuesto por uno o dos “granos” rodeados por pulpa; esta representa alrededor de un 45% del peso total (OIC, 2024). La pulpa se retira, y para eliminar la membrana de mucílago se emplean los procesos de beneficio húmedo y seco. El primero es común en el café arábica, representa el 98% de la producción en Guatemala y se realiza mediante una fermentación y lavado, brindando un producto de mayor calidad (Molina, 2017). Por otro lado, el beneficio seco requiere menos agua y equipo, ya que pasa directamente al proceso de secado, pero con un menor valor. Por último el trillado, quita el pergamino para obtener café oro listo para ser tostado o exportado (Juárez, 2018).

a. Beneficios secos

El procesamiento en seco implica un menor procedimiento y elimina la pulpa junto con las capas de mucílago. Se lava para limpiarla de microorganismos y luego se seca en dos etapas. La primera es natural, realizada en patios; la segunda es de tipo industrial. Este paso debe realizarse a baja temperatura para no dañar los granos. Sin embargo, la humedad interna del grano y la de la masa de café prolongan el tiempo de secado varios días o incluso semanas, lo que conlleva riesgos de agrietamiento, pigmentación, reducción de tamaño y pérdida de peso en el grano. Por lo tanto, es un método menos utilizado (Osorio et al., 2022).

b. Beneficios húmedos

Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del proceso de producción de café



Nota. Adaptada de Juárez, 2018.

El beneficiado húmedo incluye varios procesos, como se observa en la Figura 4. La pulpa, posee suficiente agua, se retira y queda como subproducto. Sin embargo, los granos mantienen una membrana de mucílago que representa cerca del 25.3% del peso del café después de ser despulpado con una humedad entre 89- 96% (Mantilla, 2019). Esta capa, es viscosa y rodea al fruto por su forma curva, al estar húmeda dificulta su manejo. Su eliminación reduce los tiempos de secado y el riesgo de plagas asociadas a microorganismos.

El proceso de eliminar el mucílago se lleva a cabo a través de la fermentación natural, en la que las enzimas involucradas producen reacciones bioquímicas que pueden extenderse entre 12 y 48 horas. El procedimiento consiste en la eliminación de la capa viscosa, seguida de un lavado con agua limpia para la eliminación de los residuos. Este método potencia los perfiles gustativos, destacando los matices ácidos, lo que incrementa su valor en el mercado. Sin embargo, es imperativo llevar a cabo un control riguroso para evitar la contaminación, olores desagradables y sabores desagradables derivados de la degradación de compuestos indeseables. Además, existen métodos alternativos, tales como los de naturaleza mecánica, química y biológica. Este mecanismo implica el manejo de grandes volúmenes de pulpa húmeda y una considerable cantidad de agua, lo que exige un tratamiento adecuado (Hernández et al., 2012).

5.3. Pulpa de café

a. Composición y propiedades de la pulpa de café

La pulpa de café es el subproducto más abundante en volumen durante la producción. Cuenta con un espesor considerable y un elevado contenido de humedad, factores que dificultan su manipulación y traslado. A pesar de su clasificación como residuo, posee una diversidad de componentes de importancia crítica, incluyendo proteínas, minerales y carbohidratos. La evaluación de su composición fisicoquímica y química, junto con sus atributos, es esencial para su utilización eficaz. Adicionalmente, se clasifica como un

material lignocelulósico, lo que sugiere que su composición se compone predominantemente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estas características evidencian un considerable potencial para su reutilización como materia prima.

Cuadro 1. Características químicas de la pulpa de café de la especie *C. arábica*

| Variable medida | Unidad | Base seca | Base húmeda |
|--------------------------|------------------------------------|-----------|-------------|
| pH | % | 4.21 | - |
| Humedad | % | 12.05 | 85.37 |
| Sólidos solubles totales | °Brix | 3 | - |
| Azúcares reductores | % | 45.67 | - |
| Fenoles totales | mg EAG g ⁻¹ pulpa | 4.09 | 0.91 |
| DPPH | μmol ETrolox g ⁻¹ pulpa | 132.54 | 28.93 |
| Cafeína | % | 2.262 | - |
| Proteína | % | 10.63 | 9.04 |
| Grasa | % | 5.78 | 6.93 |
| Fibra | % | 36.07 | 30.63 |
| Cenizas | % | 9.58 | - |
| Conductividad eléctrica | S/dm | 7.88 | - |
| Materia orgánica | % | 92.11 | - |

Nota. Fierro et al., 2018.

Cuadro 2. Minerales en la pulpa de café

| Variable medida | Unidad | Base seca |
|-----------------|---------------------|-----------|
| Nitrógeno (N) | g kg ⁻¹ | 17 |
| Fósforo (P) | g kg ⁻¹ | 2.48 |
| Potasio (K) | g kg ⁻¹ | 25.13 |
| Calcio (Ca) | g kg ⁻¹ | 4.1 |
| Magnesio (Mg) | g kg ⁻¹ | 1.39 |
| Sodio (Na) | g kg ⁻¹ | 2.12 |
| Boro (B) | mg kg ⁻¹ | 11 |
| Cobre (Cu) | mg kg ⁻¹ | 21 |
| Hierro (Fe) | mg kg ⁻¹ | 77 |
| Manganeso (Mn) | mg kg ⁻¹ | 46 |
| Zinc (Zn) | mg kg ⁻¹ | 11 |
| Carbono total | % | 53.428 |
| Nitrógeno total | % | 1.7 |
| Relación C/N | - | 31.43 |

Nota. Fierro et al., 2018.

Cuadro 3. Compuestos orgánicos presentes en la pulpa de café

| Compuesto | % Base seca |
|-----------------------------|-------------|
| Taninos | 1.80-8.56 |
| Sustancias pécticas totales | 6.5 |
| Azúcares no reductores | 2.0 |
| Ácido clorogénico | 2.6 |
| Ácido cafeico total | 1.6 |

Nota. Braham y Bressani, 1978.

Cuadro 4. Constituyentes de paredes celulares y polisacáridos estructurales en la pulpa de café

| Componente | g % |
|-------------------------|------|
| Contenido celular | 63.2 |
| Fibra detergente neutra | 36.8 |
| Fibra ácida detergente | 34.5 |
| Hemicelulosa | 2.3 |
| Celulosa | 17.7 |
| Lignina | 17.5 |
| Proteína lignificada | 3 |
| Proteína cruda | 10.1 |
| Cenizas insolubles | 0.4 |

Nota. Braham y Bressani, 1978.

b. Problemas ambientales asociados a los residuos de pulpa de café

De acuerdo con la Organización Internacional del Café (OIC, 2024), durante el año 2023, la producción de café ascendió a aproximadamente 165.5 millones de sacos de 60 kg, lo que equivale a 47.29 millones de toneladas de cerezas de café como desecho. La utilización de este subproducto ha sido objeto de diversos tratamientos, siendo el más prevalente la producción de abonos orgánicos, tales como el lombricompost y el compost. No obstante, estos tratamientos presentan ciertas restricciones, su uso directo como abono no es ideal debido a que la pulpa contiene altos niveles de cafeína, pectinas y otros compuestos que, si no se descomponen correctamente, pueden alterar el pH del suelo y afectar negativamente la biodiversidad microbiana, reduciendo su efectividad como abono. Además sin tratamiento adecuado puede provocar la acidificación del suelo.

La descomposición de la pulpa libera compuestos ácidos que alteran el pH del suelo, lo que afecta negativamente la biodiversidad microbiana y reduce la fertilidad del suelo. Este desequilibrio puede perjudicar la salud de los cultivos, al dificultar la absorción de nutrientes esenciales, y comprometer la biodiversidad del ecosistema agrícola. Además, los lixiviados generados durante la descomposición pueden contaminar los cuerpos de agua cercanos, arrastrando nutrientes y compuestos orgánicos que afectan la calidad del agua y alteran los ecosistemas acuáticos. Estos impactos resaltan la necesidad de un manejo

adecuado de la pulpa de café para prevenir daños tanto en el suelo como en los recursos hídricos, y asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas.

La pulpa de café, caracterizada por su abundancia en compuestos como azúcares, pectinas y ácidos orgánicos, se está desaprovechando como un recurso de gran valor. Además de los problemas previamente mencionados, su manejo inadecuado puede generar impactos ambientales adicionales. La pulpa de café, generada durante el proceso de beneficio húmedo, contribuye significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), cuando no se maneja correctamente como se observa en la *Figura 5*. Estos gases se liberan durante la descomposición anaeróbica de la pulpa, provocando malos olores y que el proceso contribuya al aumento de la huella de carbono.

Figura 5. Acumulación de pulpa de café sin tratamiento adecuado



Nota. Herrera et al, 2024.

5.4. Economía circular

a. Definición de economía circular

La economía circular surgió como una solución necesaria frente a la explotación intensiva de los recursos naturales, impulsada por el aumento de la población, la urbanización y la industrialización. A diferencia del enfoque lineal tradicional, que sigue el proceso de “extracción-producción-desecho”, este enfoque ha mostrado ser insostenible, ya que promueve un aumento en la generación de residuos debido al consumo masivo sin priorizar la reutilización. En cambio, la economía circular se centra en el aprovechamiento eficiente de los recursos, fomentando ciclos continuos no solo reduciendo las emisiones de contaminantes y los desechos en la producción. Su objetivo principal es lograr una integración más eficiente entre la economía y la naturaleza, estableciendo un sistema en el que los productos y materiales conserven su valor durante el mayor tiempo posible, garantizando así un equilibrio entre el crecimiento económico y la conservación ambiental (Geissdoerfer et al., 2017).

Además, la economía circular (EC) está relacionada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ya que sus prácticas pueden contribuir al cumplimiento de varias metas globales, promoviendo la sostenibilidad ambiental, así como el desarrollo social y económico. Según Schroeder et al. (2018), implementar este enfoque puede contribuir directamente al logro de 21 metas de los ODS e influir de manera indirecta en otras 28. Entre los más destacados se encuentran el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y limpia), el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres). Estos objetivos reflejan el interés en enfrentar la limitación de recursos, la contaminación y la pérdida de biodiversidad. Por ejemplo, en el ámbito agrícola, contribuye al desarrollo de nuevos modelos de negocio que valoran los subproductos de estos procesos, mejorando así la calidad de vida de los agricultores.

b. Bioeconomía circular

La economía circular busca desvincular la creación de valor del uso de materias primas vírgenes, propiciando un manejo de residuos que genera ahorros y beneficios ambientales a largo plazo. Como una rama de la economía circular surge la bioeconomía circular la cual esta enfocada específicamente en los recursos biológicos. La bioeconomía circular se consolida como un paradigma clave para el desarrollo sostenible, al integrar los principios de la economía circular con la producción y el uso de recursos biológicos renovables. La bioeconomía circular focaliza sus estrategias en la valorización de biomasa y residuos agroindustriales, transformándolos en bioproductos, bioenergía y materiales de alto valor añadido. De esta manera, constituye una extensión y especialización de la economía circular, orientada a reducir la dependencia de insumos fósiles, regenerar sistemas naturales y crear nuevas oportunidades de innovación y crecimiento económico sostenible.

Este concepto fue definido por Georgescu-Roegen (1975) como una perspectiva biofísica de la economía, basada en el uso de recursos biológicos renovables. La bioeconomía circular representa un avance de este concepto, al fusionar sostenibilidad biológica con eficiencia cíclica, transformando el modelo lineal de “tomar–hacer–desechar” en un sistema regenerativo (Maina et al., 2017). Este enfoque fomenta la innovación, la resiliencia de las cadenas de valor y la reconversión de residuos agroindustriales en productos de alto valor añadido, generando oportunidades económicas y laborales en el sector.

La implementación de los principios de la bioeconomía circular conlleva una reducción sustancial de la contaminación y la huella de carbono, al transformar los flujos de residuos agroindustriales en recursos útiles y energía renovable.

c. Economía circular en la industria del café

La aplicación de la economía circular a los residuos agroindustriales ha llevado a la consideración de los subproductos de la cadena agroalimentaria como una estrategia clave para convertirlos en recursos valiosos. La industria del café es una de las más grandes a nivel mundial, con más de 70 países productores. Según la United Nations Industrial Development Organization (UNIDO, 2024), este sector genera cerca de 40 millones de

toneladas de residuos biológicos anualmente. Aunque una parte de estos desechos sigue siendo desechada, una porción significativa se utiliza como abono para la producción de fertilizantes, un subproducto de bajo valor y utilidad. En lugar de ser enviados a vertederos, los residuos del café pueden reciclarse para cerrar el ciclo de vida, promoviendo su reutilización y regeneración. Estos materiales pueden transformarse en materia prima para la innovación de nuevos productos de alto valor, como cosméticos y alimentos saludables. Esto no solo impulsa la sostenibilidad del sector, sino que también crea nuevas fuentes de ingresos, fortaleciendo la resiliencia de las comunidades productoras de café.

En el caso de la pulpa de café las innovaciones actuales han facilitado la transformación de esta en una materia prima de considerable valor. De acuerdo con Restrepo y Villa (2020), se han conseguido progresos notables en la generación de biocombustibles tales como bioetanol, biobutanol y biogás. También se emplea en el proceso de producción alimenticia como infusiones, alcohol o harina sin gluten, la cual se distingue por su alto contenido de fibra y proteínas, así como en la extracción de celulosa para la fabricación de papel. Una de las aplicaciones más recientes consiste en su empleo como sustrato para la producción de hongos comestibles, fomentando la diversificación agrícola y la creación de un producto alimenticio con alto contenido proteico y valor nutricional, reduciendo los costos de producción y proporcionando una fuente de ingreso adicional para los productores y contribuyendo al cierre de ciclos dentro de un modelo de economía circular.

En estudios realizados con pulpa de café, se evaluó la composición nutricional de *Pleurotus ostreatus* cultivado en este residuo. Los resultados muestran que la seta presenta un alto contenido de humedad (87–88 %) y una concentración proteica relevante en base seca (28,6–29,7 %), con un bajo aporte de carbohidratos (< 8 %) y grasas (< 1 %). La densidad energética fue de 43–47 kcal/100 g, lo que refuerza su potencial como alimento ligero pero proteico. En cuanto a los micronutrientes, el contenido fue mayoritariamente de potasio, seguido de calcio, magnesio y sodio, además de trazas de hierro (18–21 mg/100 g). Estos resultados destacan el valor mineral de las setas obtenidas, aportando nutrientes esenciales para la dieta humana. El análisis del contenido de cafeína evidenció niveles reducidos (< 10 µg/g en muestra seca), lo que indica que el consumo del hongo cultivado en pulpa de café no representa un riesgo por este alcaloide. Asimismo, se observó que parte de la cafeína permanece retenida en el sustrato agotado, lo cual abre la posibilidad de futuras aplicaciones en la recuperación de compuestos bioactivos (Juárez et al., 2019).

En conjunto, la valorización de la pulpa de café bajo un enfoque de bioeconomía circular no solo contribuye a la reducción de la contaminación ambiental y a la mitigación de los impactos negativos de la caficultura, sino que también abre oportunidades para mejorar la seguridad alimentaria y diversificar los ingresos de las comunidades rurales. La implementación de modelos circulares en la cadena cafetalera representa un paso hacia una economía más sostenible y resiliente, donde un residuo de gran volumen se transforma en un recurso estratégico con aplicaciones alimenticias, energéticas y biotecnológicas (Limousy et al., 2017).

5.5. Introducción a la fungicultura

a. Reino fungí historia y evolución

Los organismos vivos se clasifican principalmente en cinco reinos fundamentales: especies animales, vegetales, protistas, moneras y fungi. Este último, cuyo origen se remonta a más de 500 millones de años, ha perdurado hasta la época contemporánea. Pese a su frecuente desconocimiento para la humanidad, los hongos poseen una extensa aplicación, como la levadura, empleada en una variedad de industrias, desde la panificación, la cervecera, la viticultura, hasta el descubrimiento de la penicilina, considerada un avance significativo en el ámbito farmacológico. Se estima que existen millones de especies en las que se ha documentado menos del 7%. Hoy en día, se han analizado diversas morfologías y grupos, particularmente los comestibles. Como son seres heterótrofos que transforman su fuente de alimento a nutrientes más sencillos, se ha estudiado la capacidad de diferentes residuos para ser el sustrato de estos y así ser degradados (Saucedo, 2023).

b. Hongos comestibles

En términos generales, los hongos se caracterizan por su morfología de paraguas, caracterizada por un sombrero de forma más o menos circular. Actualmente, una fracción reducida produce un cuerpo fructífero, también denominado carpóforo, que es comestible. La generación de estos novedosos productos alimenticios es una práctica que ha enriquecido las tradiciones agrícolas a través de siglos, especialmente en naciones como China, donde se han registrado pruebas de su cultivo desde el siglo II. A lo largo del tiempo, estos productos han experimentado un incremento debido a sus características nutricionales y beneficios para la salud. Se distinguen por su bajo valor calórico, ausencia de colesterol, fuente de proteínas, vitaminas del complejo B, minerales como el selenio y el zinc, y otros los posicionan como una opción idónea para dietas saludables (Montenegro y Stuardo, 2021).

De acuerdo con Cano y Romero (2016), la producción mundial de hongos cultivados es de más de 6.2 millones de toneladas, lo que tiene un valor cercano a 30 mil millones de dólares. El aumento anual en la productividad es del 11%, gracias a descubrimientos sobre sus propiedades medicinales y nutritivas. Estas propiedades incluyen un alto contenido de proteínas, vitaminas (A, B1, B2, B6, B12, C, D2, D3, niacina, vitamina D2), minerales (hierro, potasio, fósforo, cobre, selenio, calcio, magnesio, manganeso, zinc) y fibra dietética. Estas características favorecen la disminución del colesterol, los lípidos y la glucemia en el sistema circulatorio. Aunque la fungicultura se encuentre en una fase de desarrollo, aún no ha logrado su capacidad óptima, y las ventajas económicas se encuentran restringidas por la ausencia de implementación en la industria.

Dentro de la variedad de hongos comestibles, la ostra (*Pleurotus ostreatus*) ocupa el tercer lugar en producción, después del champiñón (*Agaricus bisporus*) y el shiitake (*Lentinula edodes*). Sin embargo, este ha ganado relevancia debido a su facilidad de cultivo, ya que se nutre de materia orgánica, lo que resulta en una producción accesible y económica en comparación con otras especies. Además, se distingue por su elevado

contenido en compuestos fenólicos y bioactivos, tales como los glucanos, que proporcionan características antioxidantes, antimicrobianas y antitumorales. Desde el punto de vista culinario, el hongo ostra es apreciado por su textura suave y su sabor característico. La facilidad de producción y sus beneficios para la salud han consolidado su posición como una opción económicamente viable y nutritiva en el panorama alimentario global (Rodríguez y Jaramillo, 2024).

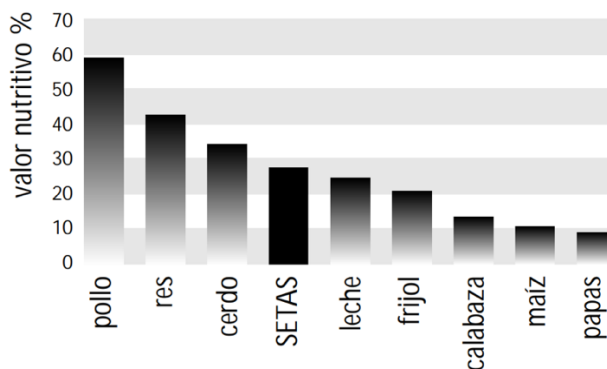
Cuadro 5. Propiedades químicas del hongo *Pleurotus ostreatus*

| Especie | Gramos por cada 100 gramos de materia fresca | | | |
|----------------------------|--|-------------|-----------|----------------|
| | Humedad | Grasa cruda | Minerales | Proteína cruda |
| <i>Pleurotus ostreatus</i> | 92 | 0.4 | 0.9 | 1.6 |

Nota. Cano y Romero, 2016.

Como se evidencia en la Figura 6, este hongo se sitúa en la cuarta posición como fuente proteica, subsecuente a la carne de pollo, res y cerdo. Este enfoque destaca la importancia del hongo ostra como un alimento saludable y fácil de conseguir. Además, cultivarlo en invernaderos o lugares controlados lo hace una opción viable para muchas regiones, especialmente en comunidades rurales. Estas prácticas ayudan a la seguridad alimentaria al ofrecer una fuente alta en proteínas y favorecen la sostenibilidad económica al utilizar residuos agroindustriales como alimento. Esto proporcionaría un bajo costo de producción facilitando su integración en programas de desarrollo agrícola y social (Gaitán et al., 2006).

Figura 6. Valor nutricional del hongo seta (%) en comparación con otros alimentos



Nota. Gaitán et al, 2006.

c. Hongos en Guatemala

Guatemala es un país caracterizado por una notable diversidad de microclimas y ecosistemas que incluyen bosques de coníferas, bosques nubosos, selvas tropicales y áreas

de transición agrícola. Esta riqueza ecológica favorece el desarrollo de una gran variedad de hongos silvestres que cumplen un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos, actuando como descomponedores de materia orgánica y estableciendo asociaciones simbióticas con especies arbóreas como pinos, encinos y pinabetes. Dichas interacciones micorrícicas fortalecen el crecimiento de las plantas y reflejan la importancia ecológica de los hongos en el equilibrio de los ecosistemas forestales. Se ha documentado en una revisión micológica más de 70 especies de hongos comestibles en el país, de las cuales 21 fueron reportadas por primera vez para Guatemala. El estudio se basó en más de 600 especímenes recolectados en 21 comunidades entre los años 2001 y 2002, actualmente depositados en la Micoteca de Macrohongos de Guatemala “Lic. Rubén Mayorga Peralta” (Bran et al., 2003)

Entre las especies de mayor aceptación cultural y comercial se encuentran:

- *Pleurotus ostreatus* (ostra gris): actualmente es la especie de mayor importancia en producción controlada en Guatemala. Su adaptabilidad a diferentes sustratos lignocelulósicos y su perfil nutricional la convierten en un recurso con gran potencial económico.
- *Pleurotus djamor* (ostra rosada): ampliamente cultivada en proyectos comunitarios debido a su rápido ciclo productivo y aceptación en mercados locales.
- *Agaricus bisporus* (champiñón de París): introducido con fines comerciales, es el hongo más comúnmente encontrado en supermercados.
- *Lentinula edodes* (shiitake): de origen asiático, su cultivo en Guatemala es incipiente, pero se ha expandido debido a su alto valor en gastronomía gourmet.

Paralelamente a esta diversidad de especies comestibles, Guatemala también alberga hongos tóxicos y potencialmente mortales, alrededor de 35 especies tóxicas cuya identificación incorrecta puede conllevar graves consecuencias. Entre los más reportados se encuentran:

- *Amanita phalloides* (hongo de la muerte): una de las especies más tóxicas del mundo, responsable de intoxicaciones graves por hepatotoxicidad.
- *Amanita muscaria* (matamoscas): reconocida por su sombrero rojo con manchas blancas; posee compuestos neurotóxicos y psicoactivos.
- *Galerina marginata*: letal incluso en pequeñas dosis, se asemeja morfológicamente a algunas especies comestibles, lo que aumenta su peligrosidad.
- *Cortinarius* spp.: contienen toxinas que afectan principalmente la función renal, ocasionando daños irreversibles.

La coexistencia de especies comestibles y tóxicas hace que la recolección silvestre sea una práctica riesgosa en ausencia de conocimiento micológico especializado. Este aspecto ha impulsado el fomento de cultivos controlados, donde se garantice la inocuidad y la trazabilidad de las especies comercializadas (Ponce et al., 2019).

d. Producción del hongo ostra en Guatemala

El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA, 2024) estima que el cultivo de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) tiene el potencial de desarrollarse de manera adecuada en 268 municipios distribuidos en 22 departamentos del país, siempre que se cumplan las condiciones ideales de temperatura comprendidas entre 18 °C y 28 °C, descritas por Chang y Miles, 2004. Estas condiciones evidencian que Guatemala posee un entorno agroecológico altamente favorable para la expansión del cultivo de hongos comestibles.

En cuanto a la dinámica productiva, el hongo ostra se caracteriza por un ciclo corto y escalonado que permite mantener la producción a lo largo del año. El ciclo total del cultivo oscila entre 2 meses (con hasta 6 ciclos anuales) dependiendo de las condiciones de manejo y sustrato utilizado. Este ciclo incluye aproximadamente 15 a 30 días de incubación y crecimiento del micelio, 15 a 20 días en la zona de fructificación y entre 45 a 60 días de cosecha. Su bajo costo de implementación y su capacidad de producir en sustratos lignocelulósicos residuales lo convierten en una alternativa productiva accesible y sostenible.

En el ámbito comercial, Guatemala ha comenzado a posicionarse en el mercado internacional de hongos procesados. Para el año 2022 se reportó un volumen exportado de 135,586 kg (135.58 toneladas métricas) de “setas y demás hongos y trufas, preparados o conservados sin vinagre ni ácido acético”. Este valor una tasa de crecimiento promedio del 3 % en volumen exportado durante el período 2018-2022.

Los principales países importadores fueron El Salvador (82 %), Honduras (9 %) y Costa Rica (8.7 %), lo que evidencia que el comercio de hongos guatemaltecos se concentra mayormente en el mercado regional centroamericano. La combinación de un alto potencial productivo, ciclos cortos de cultivo, disponibilidad de sustratos agroindustriales y un mercado regional en expansión, posicionan al hongo ostra como una oportunidad estratégica para Guatemala. Su consolidación en el mercado interno, especialmente en supermercados y cadenas de distribución, junto con el fortalecimiento de las exportaciones, puede contribuir al desarrollo de un sector emergente de alto valor agregado dentro de la economía circular.

e. Comercio de hongos en Guatemala

En el ámbito nacional, el mercado de hongos comestibles ha comenzado a consolidarse gracias a la presencia de cooperativas y empresas que impulsan tanto la producción como la distribución en supermercados y canales alternativos. Empezando por Cooperativa Integral de Producción Pueblo Unido (COINPU RL), ubicada en Chimaltenango, con más de 17 años de experiencia en la producción y comercialización de hongos frescos. Venden hongos para consumo directo, la cooperativa produce y distribuye micelio de hongo ostra en sus variedades blanco, gris y rosado, así como kits de cultivo casero y capacitaciones técnicas dirigidas a pequeños productores y comunidades rurales.

Por su parte, Agrícola Grotto (“Champiñones Grotto”) se ha consolidado como la marca más reconocida en supermercados, ofreciendo una amplia variedad de hongos en presentaciones comerciales. Su posicionamiento en cadenas de distribución formal lo convierte en uno de los principales actores en el abastecimiento del mercado interno. De manera similar, el Invernadero de Hongos Santa Rita, cuyos productos se comercializan bajo la marca Carreta, ha ingresado al mercado con champiñones frescos listos para consumo y hongos ostra en algunas temporadas, operando con invernadero controlado y sustratos compostados, lo que le permite garantizar calidad y frescura en sus productos. Asimismo, la Planta Productora de Hongos Comestibles “Ocox” ha ganado presencia en supermercados guatemaltecos, contribuyendo a diversificar la oferta de hongos disponibles para el consumidor final. Por último, Micelio Guatemala se ha posicionado como una empresa de biotecnología que trasciende la producción básica, ofreciendo semilla, bloques de cultivo, suplementos líquidos y cápsulas de extractos de hongos.

La presencia de estas iniciativas refleja un mercado emergente que, aunque todavía reducido, muestra signos de diversificación y consolidación. El ingreso de productos derivados del hongo ostra y champiñón en supermercados, sumado a la oferta de kits de cultivo, suplementos y productos de valor agregado, evidencia que Guatemala cuenta con una base empresarial que puede escalar en la medida en que aumente la demanda interna y las oportunidades de exportación.

Cuadro 6. Productos comerciales de hongos disponibles en Guatemala

| Empresa / Marca | Tipo de hongo | Precio | Presentación comercial |
|--|---|---|--|
| Agrícola Grotto (“Champiñones Grotto”) | Champiñón de París (Agaricus bisporus) | Entero Q36.95/ 340 gr Rodajas Q26.40/ 227 gr | Fresco (bandejas enteras y en rodajas), congelado (torta de champiñón) |
| | Portobelo | Q49.65/ 340 gr | |
| | Crimini | Q32.95/ 227 gr | |
| | Hongo ostra | Q42.90/ 340 gr | |
| Invernadero de Hongos Santa Rita (marca Carreta) | Champiñón de París, | Q26.95/ 227 gr | Fresco en rodajas, bandejas |
| Planta Productora Ocox | Hongo ostra | Q45.30/ 340 gr | Fresco, bandejas |
| | Hongo Cardo | Q45.30/ 227 gr | |
| COINPU RL | Hongo ostra (Pleurotus spp.) frescos y en escabeche, semilla, bloques de cultivo. | | Tiendas locales, ferias |
| Micelio Guatemala | Micelio de Hongo ostra (Pleurotus spp.) Blanco, Gris, Rosado, bloques de cultivo. | | En línea |

Nota. Este cuadro presenta los productos comerciales y derivados de hongos disponibles en Guatemala. Los datos fueron recopilados en supermercados y ferias locales, y la información de precios corresponde a agosto de 2025.

Figura 7. Productos de hongos comestibles disponibles en supermercados de Guatemala



Nota. Elaboración propia, 2025, a partir de observaciones en supermercados y ferias locales; complementado con información de Agrícola Grotto, 2022; Micelio Guatemala, 2025; La Carreta, 2025; COINPU, 2025; Ministerio de Energía y Minas de Guatemala – MEM, 2025; e IndexBox, 2025.

Fotografías de productos de hongos comestibles observados en supermercados guatemaltecos. Se muestran diferentes marcas, tipos de empaque y formatos de venta.

5.6. *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra)

a. Taxonomía y morfología

El *Pleurotus ostreatus* se categoriza en el reino Fungi, particularmente en la subdivisión Basidiomycota, que comprende hongos que generan esporas en estructuras denominadas basidios. Se clasifica dentro de la clase *Agaricomycetes*, distinguida por la generación de cuerpos fructíferos, tales como los sombreros de los hongos, y pertenece a la orden *Agaricales*, que comprende a los hongos con estructuras reproductivas análogas. Dentro de la familia *Pleurotaceae*, se distingue por su morfología singular y su naturaleza saprófita, nutriéndose de sustratos lignocelulósicos, tanto vivos como muertos, con un contenido nutricional y mineralógico limitado. Su aptitud para la descomposición de material orgánico lo establece como un organismo esencial en los ecosistemas, además además de ser una fuente rica en nutrientes, proteínas y antioxidantes, contribuyendo a la salud humana y al equilibrio ambiental. Este hongo, con su adaptabilidad a diversos sustratos, es fundamental tanto para la naturaleza como para la industria (Cruz et al., 2010).

Cuadro 7. Taxonomía de *Pleurotus ostreatus*

| | |
|--------------|----------------------------|
| Reino | Fungi |
| División | <i>Basidiomycota</i> |
| Subdivisión | <i>Agaricomycotina</i> |
| Clase | <i>Agaricomycetes</i> |
| Subclase | <i>Agaricomycetidae</i> |
| Orden | <i>Agaricales</i> |
| Familia | <i>Pleurotaceae</i> |
| Genero | <i>Pleurotus</i> |
| Especie | <i>Pleurotus ostreatus</i> |
| Nombre común | Hongo ostra |

Nota. Cruz et al., 2010.

Figura 8. Partes del *Pleurotus ostreatus*



Nota. Pineda et al., 2016.

- Píleo

El píleo, comúnmente conocido como el sombrero del hongo, se caracteriza por su forma semicircular, similar a una concha marina. Su superficie posee una textura aterciopelada con tonalidades que varían entre grises, azulados y marrones. Generalmente, su diámetro fluctúa entre 5 y 25 centímetros, con un grosor de 1 a 2 cm, presentando márgenes ondulados e irregularmente lobulados. Esta estructura está diseñada para captar eficazmente la luz y la humedad, optimizando los procesos de absorción de nutrientes e intercambio metabólico del organismo. Además es un órgano reproductivo que alberga el himenio, la superficie encargada de la producción de esporas, las cuales operan como un mecanismo de protección genética, permitiendo la dispersión eficiente de los propágulos reproductivos y favoreciendo la propagación de la especie en distintos ecosistemas (Pavel et al., 2021).

- Estípite

El estípite, comúnmente llamado pie, actúa como el soporte principal del hongo, sosteniéndolo y conectándolo al sustrato, lo que facilita la absorción y el transporte de nutrientes. Es robusto, de forma cilíndrica, con tonalidades grisáceas más claras que las del píleo. Su longitud oscila entre 2 y 5 centímetros, con un diámetro aproximado de 1 a 3 centímetros. Su estructura fibrosa y sólida no solo eleva el himenóforo, optimizando la dispersión de las esporas, sino que también desempeña un papel clave en el sostén y la funcionalidad del organismo. Este componente es esencial para la biomecánica y fisiología, asegurando tanto la estabilidad como un óptimo flujo de nutrientes (Barba y López, 2017).

- Himenio

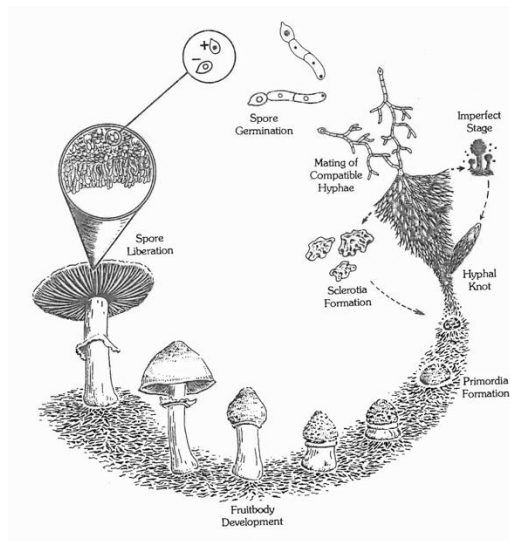
El himenio también conocido comúnmente como las laminillas, se localiza en la parte inferior del píleo. Estas estructuras delgadas y delicadas están organizadas de manera vertical y descendente, extendiéndose parcialmente hacia el estípite, presentan una coloración blanquecina o cremosa en su etapa joven, oscureciéndose progresivamente con la madurez. Su alta densidad y proximidad incrementan de manera significativa el área superficial dedicada a la producción y liberación de esporas, optimizando así los mecanismos reproductivos. Tienen una longitud promedio de entre 1 y 3 cm, con espacios variables entre ellas, y su configuración anatómica permite una mayor eficiencia en la liberación de las unidades reproductoras del hongo facilitando la dispersión y colonización de nuevos sustratos en diferentes entornos (Pavel et al., 2021).

b. Ciclo de vida

El ciclo de vida de *Pleurotus ostreatus* inicia en las laminillas del basidioma, donde se producen esporas sexuales conocidas como basidiosporas. Estas contienen un único núcleo haploide y son liberadas al ambiente mediante mecanismos de dispersión como el viento, el agua o la acción de insectos. Al caer en un sustrato adecuado con nutrientes suficientes y condiciones ambientales favorables, las basidiosporas germinan y dan origen a hifas uninucleadas. Estas hifas, al ramificarse, forman un micelio haploide que se expande indefinidamente mientras coloniza el material disponible. Este micelio inicial es crucial para establecer una base sólida de recursos que permita la futura reproducción del hongo (Stamets, 1993).

En condiciones apropiadas, las hifas del micelio haploide interactúan con otro genéticamente compatible y se fusionan, iniciando la fase dicariótica. En este estado, los núcleos parentales permanecen separados en cada célula. Este micelio dicariótico es crucial para el crecimiento vegetativo del hongo y su capacidad de adaptación, ya que combina información genética de ambos micelios parentales. Durante esta etapa, el micelio coloniza completamente el sustrato lignocelulósico, acumulando recursos para la fase reproductiva (Contreras et al., 2022).

Figura 9. Ciclo de vida de un hongo



Nota. Stamets, 1993.

En la fase reproductiva, el micelio dicariótico inicia la formación del basidioma, que incluye el sombrero y las laminillas. En las laminillas, las puntas de las hifas se convierten en basidios, estructuras donde los núcleos parentales se fusionan para formar un núcleo diploide. Posteriormente, este núcleo experimenta meiosis, lo que da lugar a cuatro núcleos haploides. Cada núcleo haploide se encapsula, completando el ciclo de vida del hongo. Este proceso garantiza la dispersión de las basidiosporas y la perpetuación de la especie (Stamets, 1993).

c. Requerimientos de crecimiento

El desarrollo exitoso de *Pleurotus ostreatus* depende de condiciones específicas durante las diferentes etapas de su crecimiento, desde la incubación del micelio hasta la formación de los cuerpos fructíferos. Los principales factores que afectan su desarrollo son la temperatura, la humedad y el pH, que deben ajustarse cuidadosamente para garantizar un cultivo óptimo.

- Temperatura

Durante la incubación del micelio, el rango de temperatura óptimo se encuentra entre 25 y 30 °C, lo que permite el crecimiento rápido y uniforme del micelio sobre el sustrato. En esta etapa, el micelio blanco invade el sustrato, preparando las condiciones para la formación de los cuerpos fructíferos. Posteriormente, durante la etapa de fructificación, las temperaturas deben reducirse a un rango de 22 a 25 °C para promover la formación de primordios y el desarrollo de los carpóforos. Según Chang y Miles (2004), la tolerancia térmica varía ligeramente dependiendo de la variedad, pero mantener estas condiciones es crucial para garantizar un rendimiento adecuado y una calidad óptima.

- Humedad

La humedad también juega un papel esencial en el desarrollo de *Pleurotus ostreatus*. Durante la incubación, el contenido de humedad del sustrato debe mantenerse entre 60 y 70 %, mientras que la humedad relativa del aire en esta etapa no es tan crítica si el sustrato fue adecuadamente hidratado antes del proceso. Durante la fructificación, la humedad relativa debe incrementarse a un rango de 70 a 80 % para evitar la deshidratación de los cuerpos fructíferos en formación. Si se detectan signos de deshidratación en las bolsas, es necesario aplicar riego moderado utilizando un atomizador. Estas condiciones aseguran que los primordios se desarrollen completamente en un período de 6 a 7 días, alcanzando un tamaño comercial adecuado (Cruz et al., 2010).

5.7. Sustratos lignocelulósicos

a. Definición y tipos

Los sustratos utilizados en el cultivo de hongos son un factor intrínseco que afecta directamente las características químicas, funcionales y sensoriales de los hongos. Un sustrato bien elegido y manejado adecuadamente es clave para obtener una producción exitosa y de alta calidad. En la producción de *Pleurotus ostreatus* su sustrato son materiales, provenientes en su mayoría de residuos agroindustriales, agrícolas y forestales debido a su capacidad para ser degradados por las enzimas producidas por este hongo. Estos materiales son lignocelulósicos ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes principales de la biomasa vegetal. Entre los residuos más comunes se incluyen la paja de trigo, arroz y cebada, el aserrín de madera, el bagazo de caña de azúcar y la pulpa de café. También se emplean residuos no convencionales como los tallos de maíz y las cáscaras de semillas de algodón. La selección del sustrato depende de la disponibilidad local, el costo y la facilidad de transporte, siendo una práctica común mezclar diferentes sustratos para optimizar el rendimiento del cultivo (Pineda et al., 2014).

- Importancia en la producción de hongos

Los hongos del género *Pleurotus* son saprófitos, lo que significa que obtienen los nutrientes necesarios para su crecimiento descomponiendo materiales lignocelulósicos. Este proceso no solo permite reciclar residuos agroindustriales, sino que también genera un producto de alto valor nutricional y comercial. La capacidad del hongo para degradar celulosa y lignina lo convierte en una herramienta eficiente para el manejo sostenible de desechos, fomentando la economía circular al convertir desechos en un recurso productivo. Según Gaitán et al. (2006), el tratamiento adecuado del sustrato es crucial, tanto en términos de su preparación como de su pasteurización o esterilización, ya que estos procesos ayudan a eliminar microorganismos no deseados. Además, es fundamental considerar su composición física y química para determinar si es necesario realizar una suplementación adecuada de nutrientes, como nitrógeno y otros nutrientes esenciales, para mejorar la producción y maximizar el rendimiento biológico del cultivo. También se debe

tener en cuenta otras características del sustrato, ya que estas afectan su capacidad para retener humedad, lo cual es esencial para el crecimiento óptimo del micelio.

b. Propiedades de los sustratos para para *Pleurotus ostreatus*

- Propiedades químicas del sustrato
 - Relación C/N

Los hongos, a diferencia de las plantas, no realizan fotosíntesis y dependen de materia orgánica para obtener carbono y energía. El carbono es el principal nutriente requerido por el hongo, disponible en materiales lignocelulósicos como celulosa, hemicelulosa y lignina, que son descompuestos mediante enzimas extracelulares como celulasas y ligninasas. Además, debe contener nitrógeno en cantidades adecuadas, esencial para la síntesis de proteínas ácidos nucleicos y otros componentes celulares. Algunos materiales ricos en nitrógeno, son como harina de soja, salvado de trigo o urea y suelen utilizadas como fuente complementaria y enriquecer el sustrato lo que mejora el perfil nutricional del sustrato (Nandeha, 2024).

La relación carbono/nitrógeno (C/N) desempeña un papel crítico en el crecimiento de *Pleurotus ostreatus*, ya que relaciona la fuente de energía con su alimento para satisfacer sus necesidades metabólicas, los sustratos óptimos presentan una relación C/N en el rango de 20:1 a 30:1, lo que favorece la colonización del micelio y el desarrollo de cuerpos fructíferos de alta calidad (Chang y Miles, 2004). Dependiendo del tipo de material, los sustratos pueden presentar relaciones muy variables. Por ejemplo:

- Los sustratos naturales, como los troncos de madera sin preparación previa, presentan una relación C/N superior a 100:1.
- Los residuos agroindustriales, como la paja pretratada, suelen tener una relación C/N entre 50:1 y 100:1, especialmente cuando se someten a un compostaje corto y una pasteurización severa, o solo a pasteurización.
- Los sustratos con una relación C/N entre 15:1 y 25:1 se adaptan bien a condiciones que requieren esterilización, buena asepsia y responden a las exigencias del mercado.

En el caso de sustratos como la pulpa de café, cuya proporción inicial de nitrógeno puede llegar a ser baja en comparación con su contenido de carbono, se recomienda la suplementación con materiales ricos en nitrógeno, como salvado de arroz o harina de soya para obtener una relación C/N más equilibrada, permitiendo una degradación más eficiente de la lignina y la celulosa evitando acumulaciones de amoníaco que podrían ser perjudiciales para el micelio (González et al., 2020). También para ajustar la relación C/N se puede utilizar una la fermentación aerobia reducir la competencia microbiana y optimizar las condiciones de crecimiento del hongo (García et al., 2011).

- Parámetros de calidad orgánica

Los parámetros de calidad orgánica son indicadores clave que la capacidad de un sustrato para sustentar vida vegetal, microbiológica. Incluyen factores como el carbono orgánico, la materia orgánica y la ceniza, los cuales influyen en la estructura y la

funcionalidad del sustrato, así como en la disponibilidad de nutrientes esenciales. Para el cultivo de hongos, estos parámetros son fundamentales, ya que afectan la capacidad del sustrato para promover el crecimiento y desarrollo del micelio, además de influir en el rendimiento de la producción de cuerpos fructíferos y así entender la salud y la capacidad de producción del sustrato, y es crucial en diversos contextos agrícolas, forestales y ambientales relacionados con la producción fúngica (Chang y Miles, 2004).

El carbono orgánico (C.O.) indica la fracción carbonada presente en compuestos no carbonatados del sustrato y sirve como indicador del potencial energético para la respiración micelial. Un valor situado entre 25 y 35 % favorece la formación de enzimas oxidativas, aporta CO₂ estable al microambiente y mejora la rendimiento biológico de *Pleurotus ostreatus*. Ahora bien, la materia orgánica (M.O.), compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas y lípidos, constituye la reserva nutritiva y estructural del sustrato. Ambos parámetros son esenciales porque determinan la calidad y funcionalidad del medio de cultivo, proporcionando la energía y los nutrientes necesarios para el crecimiento del micelio, la producción de enzimas degradadoras y la formación de cuerpos fructíferos de manera eficiente (Garcés et al., 2005).

El contenido de ceniza representa el residuo mineral que permanece tras calcinación hasta masa constante, en muchos casos son carga de sales, en residuos agro-industriales la mayor cantidad son dominadas por potasio y calcio; sin embargo se deben considerar otros elementos, como el arsénico, el cadmio y el plomo que no solo son tóxicos, sino que también afectan la biodegradación y el crecimiento fúngico (Alonso et al., 2004).

Respecto al crecimiento y desarrollo de los hongos, los minerales juegan un papel crucial, ya que posteriormente se acumulan en los cuerpos fructíferos, como ocurre en *Pleurotus ostreatus*. Los minerales como el fósforo, potasio, magnesio, azufre, calcio, hierro, cobre, zinc, manganeso y cobalto son cruciales. Estos minerales cumplen roles importantes en el metabolismo de los hongos, incluyendo la formación de enzimas y la actividad celular, como la producción de lacasas, que es activada por el cobre. Además, la calidad del sustrato utilizado influye en la concentración de estos nutrientes (Bellettini et al., 2016).

Los micronutrientes, aunque requeridos en menor cantidad, son igualmente esenciales para la actividad metabólica de los hongos. Elementos como el zinc, manganeso, hierro y cobre son importantes para las reacciones enzimáticas y la bioacumulación de metales. Sin embargo, el exceso de estos nutrientes puede afectar negativamente el crecimiento de los hongos, como ocurre con el cobre y el zinc en concentraciones altas (Patel et al., 2009).

- pH

El pH del sustrato es otro factor determinante para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Durante la incubación, el rango óptimo de pH es de 5.5 a 6.5, lo que favorece la actividad enzimática del micelio y la descomposición eficiente de los compuestos orgánicos del sustrato. Cambios significativos en el pH fuera de este rango pueden inhibir el crecimiento del micelio o reducir la eficiencia del cultivo (Chang y Miles, 2004). Además, la regulación del pH durante la preparación del sustrato puede lograrse mediante la adición de agentes

alcalinos como cal agrícola o carbonato de calcio, asegurando un entorno adecuado para el desarrollo del hongo.

- Propiedades físicas del sustrato
 - Humedad

El contenido de humedad es un factor crucial para el desarrollo de *Pleurotus ostreatus*, ya que afecta directamente la actividad metabólica del micelio. Un rango óptimo de humedad entre 60 % y 75 % asegura la disponibilidad de agua sin crear condiciones anaeróbicas que favorecen la proliferación de microorganismos competidores. La preparación del sustrato debe incluir un proceso de hidratación uniforme para mantener la estructura y evitar problemas de compactación. La humedad excesiva puede corregirse mediante un drenaje adecuado o ajustes en la mezcla. Además, la capacidad del sustrato para retener humedad es crítica para mantener niveles de hidratación adecuados para la actividad del micelio. Los sustratos con buena capacidad de retención de agua, como la paja o el estiércol compostado, proporcionan un suministro constante de agua, reduciendo la necesidad de riego frecuente (García et al., 2011).

- Aireación

La aireación adecuada del sustrato es crucial en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, ya que permite la entrada de oxígeno necesaria para el crecimiento del micelio y la expulsión de dióxido de carbono, evitando condiciones anaeróbicas que inhiben el desarrollo del hongo. Los hongos requieren oxígeno para la respiración, por lo que una aireación eficiente asegura un suministro constante de oxígeno y permite la liberación del dióxido de carbono producido durante los procesos metabólicos. La falta de aireación puede perjudicar el crecimiento del micelio, pero puede mejorarse mediante técnicas como voltear el sustrato o utilizar bolsas perforadas. La pulpa de café, aunque rica en nutrientes, tiende a compactarse, lo que limita la aireación del sustrato. Una estrategia efectiva para contrarrestar esta limitación es mezclar la pulpa con materiales más porosos, como paja de trigo, bagazo de caña de azúcar o aserrín, los cuales no solo aumentan la porosidad del sustrato, sino que también favorecen la colonización del micelio (García et al., 2011).

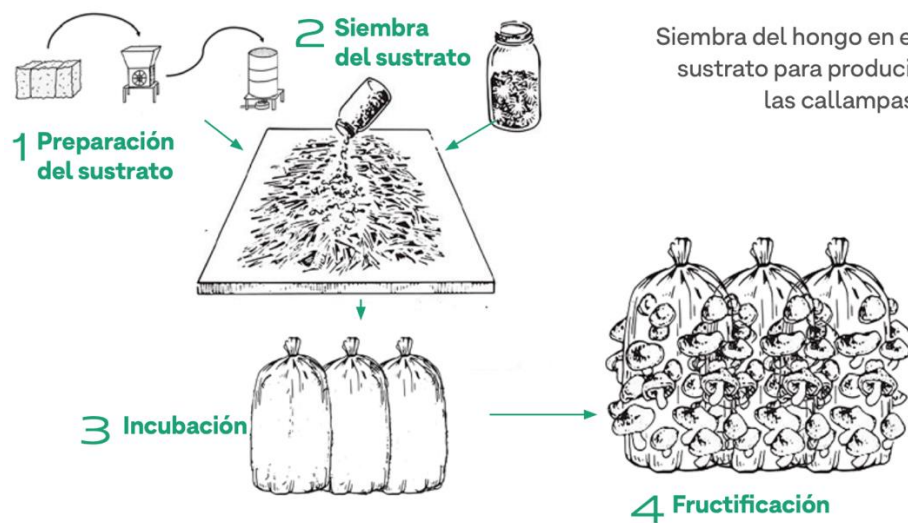
Diversos estudios han demostrado que mezclar pulpa de café con otros materiales estructurales como paja de trigo, bagazo de caña o viruta de madera es ideal para mejorar las condiciones físicas del sustrato en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Debido a que estos materiales tienen una estructura fibrosa y rígida, que mejora densidad del sustrato, aumenta su porosidad y la aireación al evitar la compactación del sustrato y contribuye a una mayor oxigenación y retención de humedad. Estas propiedades físicas no solo optimizan las condiciones para la actividad microbiana, sino que también favorecen la colonización uniforme del micelio. Sin embargo, la proporción exacta puede ajustarse según las características del material disponible y las necesidades específicas del cultivo (Acevedo, 2017).

- Porosidad

La porosidad del sustrato influye directamente en su capacidad para retener agua y aire, elementos esenciales para la actividad del micelio permitiendo un crecimiento aeróbico del hongo. Los sustratos finos pueden compactarse, reduciendo la aireación y creando condiciones anaeróbicas que son perjudiciales. Sustratos como el paja y el aserrín tienen alta porosidad, lo que favorece la distribución uniforme del micelio y un desarrollo óptimo de los carpóforos. En contraste, materiales más densos, que pueden requerir tratamientos previos o mezclas con materiales porosos para evitar problemas de compactación y mejorar la estructura física del sustrato (Stamets, 1993).

5.8. Cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Figura 10. Proceso de cultivo de hongos comestibles



Nota. Montenegro y Stuardo, 2021.

a. Tratamiento del sustrato

El tratamiento del sustrato es un paso fundamental para asegurar un crecimiento óptimo del hongo y reducir la competencia de microorganismos indeseados. Es indispensable acondicionar correctamente el material orgánico, ya que esto facilita la colonización del micelio y favorece la obtención de fructificaciones. Este proceso implica la optimización de las propiedades físicas y químicas, además de reducir o eliminar la carga microbiana nociva naturalmente presente. El tratamiento adecuado favorece un ambiente más controlado para el desarrollo del hongo, asegurando una mayor producción y calidad de los cultivos (Barba y López, 2017).

La preparación de este depende de sus características físico-químicas, que determinan que microorganismos pueden desarrollarse sobre él. Aunque algunos hongos pueden utilizar una amplia variedad de sustratos, otros son más selectivos y requieren condiciones específicas. La selección del sustrato ideal depende de factores como la disponibilidad de nutrientes, la acidez, la actividad microbiana, la aireación y el contenido de agua (Martínez et al., 2000).

El tratamiento del sustrato incluye etapas como picado, fermentación, secado y esterilización, entre otras, cuyo objetivo es hacer los nutrientes más accesibles para el micelio, favoreciendo así un desarrollo óptimo y el crecimiento de las fructificaciones. En el caso del picado, este proceso consiste en reducir el tamaño del material para mejorar la superficie de contacto y facilitar la penetración del hongo, lo que promueve una colonización más eficiente. Sin embargo, en el caso específico de la pulpa de café, puede emplearse directamente en su forma natural, tal como se obtiene del beneficio, sin necesidad de triturarla o picarla, ya que su estructura permite una adecuada invasión del micelio y optimiza el proceso de colonización (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2001).

- Esterilización

La esterilización representa un procedimiento fundamental en la producción de hongos comestibles, dado que disminuye la presencia de bacterias en el sustrato. Este método facilita la colonización del micelio del hongo con una competencia reducida. Existen múltiples procesos, tales como la pasteurización, la esterilización mediante vapor, la inmersión en agua caliente y la inmersión alcalina, cada una con beneficios y desventajas que varían en función de los recursos disponibles, la escala de producción y las propiedades del sustrato. Por ejemplo, la inmersión alcalina representa un método de bajo costo y aplicación sencilla, óptimo para regiones con recursos limitados. La esterilización mediante vapor o la inmersión en agua caliente son los métodos más frecuentes. Estos procedimientos tienen como objetivo erradicar los microorganismos perjudiciales, lo que es fundamental para favorecer el crecimiento del micelio y mejorar la producción de setas (Bermúdez et al., 2007).

- Esterilización con inmersión en agua caliente

Este método implica la inmersión del sustrato en agua caliente, manteniendo temperaturas entre 70 y 80 °C durante un periodo que generalmente oscila entre 1 y 2 horas, dependiendo de las características del sustrato y el nivel de contaminación esperado. Es una técnica económica y eficaz para disminuir la carga microbiana, facilitando así la colonización eficiente por el micelio. Sin embargo, es crucial regular tanto la temperatura como la duración del tratamiento para evitar posibles daños en el sustrato. Cabe destacar que estos parámetros pueden variar según las condiciones locales, ya que factores como la altitud sobre el nivel del mar y las particularidades del entorno influyen significativamente en el proceso (IICA, 2001).

- Esterilización con inmersión alcalina

La esterilización a través de la inmersión alcalina es un método muy utilizado debido a su facilidad, bajo costo y operación en frío. El procedimiento implica la inmersión del sustrato en una solución constituida por agua y cal agrícola o hidratada durante un periodo que oscila entre 12 y 48 horas. La dosificación de cal agrícola que se recomienda es una libra por cada 50 litros de agua. Este procedimiento disminuye la carga microbiana del material, genera un ambiente favorable para el desarrollo del micelio del hongo. Este método es apropiado en zonas con escasos recursos o cultivos a pequeña escala, dado que

no necesita de maquinaria especializada ni la utilización de altas temperaturas. No obstante, a pesar de su eficacia puede llegar a no eliminar por completo huevos, larvas de insectos presentes (IICA, 2001).

b. Inoculación

El proceso de inoculación implica la introducción del micelio del hongo en el sustrato previamente tratado, con la finalidad de formar una colonia capaz de desarrollarse y generar frutos. Con frecuencia, se emplea el término "spawn" o semilla micelial, que implica la propagación del micelio en granos o en otros materiales, como aserrín, estacas de madera o incluso sustratos suplementarios (Stamets, 1993). Este micelio desempeña el papel de un "sembrador" que coloniza el sustrato, y su calidad es fundamental para el éxito del cultivo. Es esencial que el sustrato se encuentre a una temperatura apropiada, usualmente entre 20 y 25 °C, para prevenir el daño al micelio debido al calor residual resultante del tratamiento térmico previo.

Existen diferentes técnicas de inoculación dependiendo del sistema de producción. Por ejemplo los sustratos tratados pueden ser inoculados dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones ambientales. En sistemas más rústicos como los troncos, el micelio se introduce directamente en perforaciones o cavidades. En cultivos más avanzados, como en bolsas, bandejas o columnas, el micelio se mezcla homogéneamente con el sustrato pasteurizado o esterilizado, proporcionando mayor control y uniformidad en el desarrollo (Martínez et al., 2000).

La cantidad de inóculo o semilla utilizada en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* es un factor determinante un factor determinante para el éxito del proceso productivo. Esta dosis varía según la cepa empleada y el tipo de sustrato, encontrándose generalmente en un rango del 12 % al 25 % en base al peso húmedo del sustrato. Este intervalo asegura que el micelio tenga una competitividad frente a otros microorganismos, ventaja siempre que la inoculación se realice bajo condiciones asépticas para prevenir contaminaciones externas (Montenegro y Stuardo, 2021).

Un aumento moderado en la cantidad de inóculo puede reducir el tiempo de colonización, favorecer la formación temprana de primordios y disminuir la probabilidad de invasión por microorganismos competidores (Stamets, 1993). No obstante, en contextos de producción comercial, se recomienda no superar el 25 % del peso del sustrato, ya que no se ha observado un incremento significativo en la rendimiento biológico por encima de este umbral, lo que podría traducirse en pérdidas económicas. Por otro lado, una dosis inferior a la recomendada puede provocar un rápido agotamiento de los nutrientes disponibles, reduciendo la actividad metabólica del micelio y, en consecuencia, disminuyendo la producción de hongos.

c. Incubación

En esta fase en la que el micelio se desarrolla y coloniza completamente el sustrato, formando una capa blanca y homogénea que indica un crecimiento exitoso. Este proceso se lleva a cabo en condiciones ambientales controladas, como una temperatura entre 20 y 28 °C, alta humedad relativa >60% y ventilación adecuada para evitar la acumulación de

dióxido de carbono, que podría inhibir el crecimiento del micelio. Es crucial que esta etapa se realice en completa oscuridad, ya que la luz puede interrumpir el desarrollo micelial e inducir una fructificación prematura, lo cual no es deseable en esta fase (Chang y Miles, 2004).

Durante la incubación, el micelio secreta enzimas que degradan los componentes lignocelulósicos del sustrato, transformándolos en nutrientes disponibles para el hongo. La duración de esta etapa varía según la especie. Por ejemplo, *Pleurotus ostreatus* puede colonizar el sustrato completamente en un período de 7-14 días dependiendo del sustrato; para especies requieren períodos más largos, que pueden oscilar entre 60 y 120 días (Martínez et al., 2000).

d. Fructificación

Durante este procedimiento, el micelio transita desde la etapa vegetativa hacia la reproductiva, resultando en la formación de los cuerpos fructíferos o setas. Este cambio es ocasionado por elementos ambientales específicos, tales como una reducción en la temperatura, un aumento en la ventilación con el objetivo de minimizar el CO_2 y una exposición adecuada al sol. Las condiciones de crecimiento para esta especie, aunque suelen abarcar temperaturas que oscilan entre 15 y 20 °C y una humedad relativa que supera el 80%. Para preservar esta elevada humedad relativa, es habitual la aplicación controlada de agua sobre el sustrato, lo cual contribuye a prevenir la desecación y fomenta el desarrollo de las estructuras iniciales conocidas como primordios, que culminan en setas maduras preparadas para la recolección en un período de 4 a 7 días (Chang y Miles, 2004).

En términos promedio, el periodo de recolección inicial se caracteriza por oscilar entre 1 y 3 días, seguido de un intervalo de reposo de 1 a 2 semanas para facilitar la reactivación de la producción. Es indispensable mantener las condiciones ambientales reguladas durante este periodo, tales como temperatura, iluminación y humedad, con el fin de prevenir la contaminación o perjuicios en las bolsas de cultivo. La producción de una bolsa de setas puede variar entre dos y cuatro cosechas, siendo las dos primeras las más significativas al concentrar el 90% de la producción total. Elementos tales como la calidad del sustrato, la gestión ambiental y la existencia de plagas pueden tener un impacto en el rendimiento y la calidad de los cuerpos fructíferos (Gaitán et al., 2006).

e. Evaluación del rendimiento productivo

- Eficiencia biológica

La eficiencia biológica (EB) es un indicador de la productividad de los cultivos de hongos. Se define como la relación entre el peso fresco de los hongos producidos y el peso seco del sustrato utilizado. Este parámetro refleja la capacidad de los hongos para convertir los nutrientes del sustrato en biomasa. Un valor alto indica una alta eficiencia en la utilización de los recursos, lo que es crucial para maximizar la producción en sistemas de cultivo, esto les permite ajustar las condiciones de cultivo para optimizar los recursos y aumentar la productividad.

Ecuación 1. Eficiencia biológica

$$EB = \frac{PFto}{PSS} \cdot 100$$

Donde:

EB: Eficiencia biológica.

PFto: Peso fresco total de hongos, (kg)

PSS: Peso seco del sustrato, (kg) (Zárate, 2015).

- Tasa de producción

La tasa de producción es un indicador que refleja cuán rápido y eficiente es el proceso de cultivo de hongos, permitiendo a los productores analizar el ritmo de crecimiento y la productividad diaria de estos. Se calcula tomando la eficiencia biológica (EB) y dividiéndola por el tiempo total requerido para completar un ciclo de producción, es especialmente útil en la optimización de los tiempos de cultivo y la planificación de cosechas.

Ecuación 2. Tasa de producción

$$T_p = \frac{EB}{PP} \cdot 100$$

Donde:

T_p : Tasa de producción

EB: Eficiencia biológica

PP: Días totales de producción (Zárate, 2015).

- Precocidad

Este parámetro se refiere al tiempo que transcurre entre la incubación o cosecha inicial y la producción de la siguiente oleada productiva. Esta variable es clave porque un hongo más precoz genera más ciclos productivos en el año, lo que se traduce en una mayor producción de basidiocarpos frescos. En general para especies como *Pleurotus ostreatus* los intervalos entre cada oleada productiva pueden estar entre 7 y 15 días. También se puede considerar como el “tiempo de recuperación” necesario para que un hongo produzca una nueva cosecha. Esto permite medir la eficiencia del ciclo de producción y ajustar el tiempo de cultivo para maximizar la producción anual.

Ecuación 3. Precocidad

$$P_{cd} = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_n)}{NO}$$

Donde:

P_{cd} : Precocidad promedio, expresada en días

t_1 : Intervalo de tiempo para obtener la primera oleada.

t_2 : Intervalo de tiempo para obtener la segunda oleada.

t_3 : Intervalo de tiempo para obtener la tercera oleada.

t_n : Intervalo de tiempo para obtener el n oleadas.

NO: Número de oleadas (Zárate, 2015).

- Biodegradación del sustrato

Este parámetro se refiere al proceso a través del cual los hongos degradan la materia orgánica presente en el sustrato que emplean para su desarrollo. Este procedimiento es crucial dado que estos descomponen componentes complejos como la celulosa y la lignina presentes en materiales orgánicos, liberando nutrientes que los hongos utilizan para su crecimiento y fructificación. Este facilita la cuantificación de la materia orgánica que los hongos han descompuesto y empleado para su desarrollo. Este proceso de descomposición no solo favorece el desarrollo de los hongos, sino que también una vez concluido el ciclo de vida de los hongos.

Ecuación 4. Biodegradación del sustrato

$$B_s = \frac{(PSH_{ini} - PSH_{fin})}{PSH_{ini}} \cdot 100$$

Donde:

B : Tasa de biodegradación del sustrato, (%)

PSH_{ini} : masa del sustrato húmedo inicial, (kg)

PSH_{fin} : masa del sustrato húmedo final, (kg) (Zárate, 2015)

5.9. Balance de masa

El balance de masa se basa en la ley de conservación de la materia, la cual establece que la materia no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Este principio es de suma importancia en los procesos industriales. La conservación de la materia exige que la masa que ingresa a un sistema sea igual a la suma de la masa que se acumula en él más la masa que sale del mismo. Esto evita pérdidas o ganancias no justificadas, además sirven

como una herramienta básica para describir y analizar los procesos, ya que considera variables como concentraciones, cantidades, temperaturas y demás características relevantes. Para su representación, es común utilizar cajas negras, el cual facilita la visualización de las operaciones al centrarse únicamente en las corrientes de entrada y salida, sin detallar las transformaciones internas del sistema (McCabe, 2012).

Es posible describir los balances de diferentes formas, de forma global a todo el proceso, a equipos individuales o incluso a corrientes específicas dentro de un sistema. Según el tipo de análisis, los balances pueden formularse de manera diferencial, describiendo el comportamiento instantáneo del sistema mediante flujos o velocidades, o de forma integral, evaluando los cambios de masa en un intervalo de tiempo definido. Dependiendo de las condiciones del proceso, estas ecuaciones pueden simplificarse en diferentes formas:

- La ecuación general para un sistema abierto:

$$\text{Entrada} - \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

- Sistema en estado estacionario (sin acumulación):

$$\text{Entrada} + \text{Generación} = \text{Salida} + \text{Consumo}$$

- Si no hay reacción química, se simplifica a:

$$\text{Entrada} = \text{Salidas}$$

(Felder & Rousseau, 2018)

5.10. Balance de energía

Los balances de energía se fundamentan en la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma entre sus distintas formas. Un balance de energía se aplica a un proceso, o a una parte específica del mismo, delimitada por un límite imaginario que separa el sistema de sus alrededores (McCabe, 2012).

En un balance de energía, la energía total de un sistema se compone de tres formas principales: energía cinética asociada al movimiento traslacional del sistema como un todo con respecto a un marco de referencia definido, la energía potencial relacionada con la posición del sistema, la energía interna incluye toda la energía asociada al movimiento molecular, rotacional, vibracional, las interacciones electromagnéticas y las energías de los constituyentes atómicos y subatómicos. En un sistema cerrado, donde no hay transferencia de masa a través de sus fronteras, la energía se intercambia con los alrededores en forma de calor o trabajo (Felder & Rousseau, 2018).

En su forma general, la suma de las energías cinética, potencial e interna que ingresan al sistema, más el calor recibido, menos el trabajo realizado y la energía que sale, es igual

a la energía acumulada en el sistema. En forma simplificada, el balance de energía se expresa como:

$$\Delta E_p + \Delta E_k + \Delta U = Q + W$$

En los sistemas abiertos, donde hay flujo de masa a través de las fronteras del sistema, es común sustituir el término de energía interna (U) por la entalpía (H) ya que la entalpía contempla tanto la energía interna como el trabajo de flujo requerido para introducir o extraer materia del sistema (McCabe, 2012).

5.11. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo es una herramienta gráfica utilizada para representar y organizar las diversas etapas de un proceso. Ilustra las corrientes de entrada y salida con flechas para indicar la dirección de las corrientes. Para las operaciones o equipos principales involucrados, se utilizan recuadros u otros símbolos para representar las unidades de proceso (como reactores, mezcladores o separadores). Este diagrama puede representarse como un diagrama de bloques que proporciona una visión general del proceso, en el que los equipos y operaciones se representan mediante bloques esquemáticos, mientras que el diagrama de flujo de procesos ofrece un nivel de detalle superior al exhibir los equipos principales. Ambos tipos de diagramas se involucran con los balances de masa y energía, ya que ayudan a identificar y etiquetar las corrientes con información importante como flujos de masa, composiciones, temperaturas y la ubicación de puntos de mezcla y división, donde se llevan a cabo balances por componentes (Felder & Rousseau, 2018).

5.12. Contaminantes comunes en el cultivo de hongos

El cultivo de hongos comestibles como *Pleurotus ostreatus* es sensible a diversos contaminantes biológicos que pueden afectar la calidad y el rendimiento de la producción. Entre los contaminantes más comunes se encuentran las moscas del género *Lycoriella sp.* y el hongo *Trichoderma spp.*, los cuales pueden tener un impacto negativo en el crecimiento y desarrollo de los hongos.

La mosca perteneciente a la familia *Lycoriella sp.*, se manifiestan en la generación de hongos comestibles a causa del entorno húmedo o rico en materia orgánica que se encuentra en el sustrato. Estas moscas, al estar presentes, depositan sus huevos en el sustrato, lo que genera la aparición de larvas que se nutren del sustrato y del micelio, ocasionando interferencias en el crecimiento de los hongos tanto en su colonización como en la creación de cuerpo fructífero, lo que perjudica la calidad del producto final. Para prevenir su aparición, es crucial establecer un sistema de invernadero y otras medidas de control, como barreras físicas como mallas finas y nylons, que eviten el ingreso de la mosca pero faciliten una ventilación adecuada. Esto facilitaría la conservación de una higiene adecuada en el entorno, previniendo el exceso de humedad y residuos orgánicos no colonizados por micelio.

Ahora, el otro contaminante más común es el hongo *Trichoderma spp.* Este es un hongo biocontrolador que se utiliza en el desarrollo de enzimas y compuestos que promueven el desarrollo vegetal, ayudando a mejorar la resistencia de las plantas a enfermedades y

promoviendo su crecimiento. Este, al igual que el *Pleurotus ostreatus*, es un organismo saprófito, es decir, se alimenta de materia orgánica en descomposición. Este hongo suele aparecer debido a los ambientes húmedos, la humedad del sustrato y la aireación de este sustrato, provocando que ambos hongos compitan entre sí, por su diferencia de metabolismos. *Trichoderma spp.* Produce toxinas que debilitan el desarrollo de *Pleurotus ostreatus*; sin embargo, este genera resistencia ante él. Sin embargo, llegan a intoxicarse entre ellos, provocando que el bloque se descomponga y ya no pueda utilizarse.

Por eso es importante la aireación del sustrato para que el micelio pueda desarrollarse adecuadamente, aplicando prácticas adecuadas de pasteurización de los sustratos, asegurando una correcta aireación y control de la humedad en las fases de cultivo (Ghimire et al., 2021).

5.13. Prevención de contaminaciones en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

En el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, la contaminación es uno de los mayores desafíos, ya que puede inhibir la colonización del sustrato y reducir la producción de cuerpos fructíferos. Según Stamets (1993), existen seis principales fuentes de contaminación en un laboratorio: el personal de cultivo, el aire, el medio de cultivo, las herramientas, el inóculo y las unidades móviles de contaminación (MCU). Cada una de estas fuentes requiere medidas específicas de prevención para garantizar un ambiente de trabajo adecuado.

- El personal de cultivo: el cuerpo humano es un portador natural de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y virus. Para reducir su impacto, es fundamental utilizar guantes, ropa protectora y desinfectar frecuentemente las manos y herramientas con alcohol isopropílico al 80%. Además, las personas enfermas deben evitar ingresar al laboratorio para prevenir la propagación de contaminantes.
- El aire: este es un medio común para la dispersión de microorganismos. Las partículas suspendidas pueden depositarse en el sustrato o el medio durante procesos como la inoculación. El uso de filtros HEPA y la presurización positiva del laboratorio son estrategias efectivas para reducir la contaminación aérea. Alternativamente, la aplicación de desinfectantes en aerosol y la limpieza constante también contribuyen a mitigar este problema.
- El medio de cultivo: la esterilización insuficiente del sustrato o del medio de cultivo es una causa frecuente de contaminación. Aunque el tratamiento térmico estándar es de 15-20 minutos a 121 °C y 1 atm, Stamets (1993) recomienda extender este tiempo a un mínimo de 40 minutos para garantizar la eliminación de esporas bacterianas resistentes y otros microorganismos.
- Las herramientas y el inóculo: las herramientas deben desinfectarse rigurosamente antes y durante su uso, ya sea mediante flameado o con soluciones desinfectantes. Asimismo, el inóculo debe derivar de cultivos puros y libres de contaminantes, evitando transferir microorganismos competidores al sustrato.
- Unidades móviles de contaminación (MCU): plagas como insectos, ácaros y otras pequeñas entidades biológicas pueden actuar como vehículos de contaminación. Barreras físicas, trampas adhesivas y una limpieza constante del espacio son estrategias efectivas para su control.

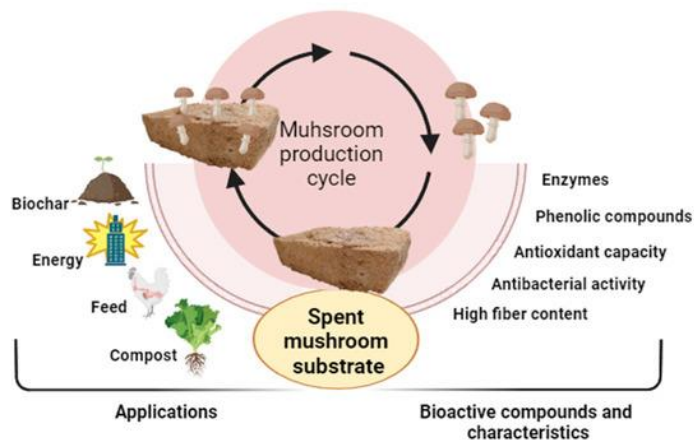
La correcta implementación de estas medidas no solo minimiza las fuentes de contaminación, sino que también mejora significativamente la eficiencia del cultivo y la calidad del producto final. Al garantizar un sustrato bien tratado y un ambiente controlado, se maximiza la productividad y se evitan pérdidas innecesarias.

5.14. Manejo del sustrato de hongos gastado

Durante el cultivo de hongos, el micelio actúa como una red tridimensional de hifas cuyas paredes están formadas por quitina, β -glucanos, proteínas y lípidos. Durante la colonización degrada la lignocelulosa y simultáneamente se adhiere las partículas del sustrato, creando un polímero estructural de origen biológico. Una vez concluida la cosecha de hongos, el sustrato gastado conserva esta estructura micelial, lo que abre la posibilidad de buscar nuevas aplicaciones de valor. Al aprovechar las propiedades adquiridas como la densidad, porosidad es posible transformar este residuo en el desarrollo de micomateriales, recientemente se está impulsando el aprovechamiento del sustrato residual tras la producción de hongos, la cual ya utiliza residuos lignocelulósicos como materia prima. De esta manera, se promueve una doble valorización de los materiales y se contribuye a un modelo de producción aún más circular y sostenible (Joshi et al., 2020).

El sustrato de hongos gastado, conocido como SMS (Spent Mushroom Substrate), es la biomasa residual que queda tras la cosecha de los carpóforos. Está compuesto por la red micelial remanente, materiales lignocelulósicos parcialmente degradados y suplementos nutricionales no consumidos. Durante el cultivo, el micelio degrada entre el 25 y 75 % de celulosa, hemicelulosa y lignina del sustrato, generando un residuo con alto contenido de carbono estabilizado, enzimas activas y polisacáridos funcionales. En Malasia, una granja promedio que produce 100 toneladas de hongos frescos genera aproximadamente 438 toneladas de SMS por año. Esta composición rica en materia orgánica y nutrientes convierte al SMS en un recurso de gran interés para aplicaciones agrícolas, biotecnológicas y ambientales (Phan y Sabaratnam, 2012).

Figura 11. Ciclo de producción de hongos y compuestos bioactivos del sustrato de hongos gastado y principales aplicaciones



Nota. Baptista et al., 2023.

Durante el proceso de cultivo, el micelio asimila entre 25 y 75 % de los componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina de sustratos que pueden incluir paja, aserrín o pulpa de café, dejando un residuo con alto contenido de carbono estabilizado y enzimas extracelulares activas. En México, Montes et al. (2018) reportaron propiedades fisicoquímicas del SMS en lotes de *Pleurotus*, incluyendo un pH entre 4.4 y 4.8, conductividad eléctrica de aproximadamente 6.8 dS m⁻¹, más del 50 % de materia orgánica, y un contenido de nitrógeno de 13 g kg⁻¹, además de niveles elevados de potasio y micronutrientes por debajo de concentraciones tóxicas. Por lo que comúnmente aplicado como enmienda orgánica en cultivos agrícolas y hortícolas. Su estructura porosa favorece la aireación del suelo, mejora la retención de agua y estimula el desarrollo radicular. Además, puede utilizarse como sustrato para almácigos y plantas en vivero, o como portador de agentes biocontroladores como *Trichoderma spp.* en estrategias de manejo integrado de plagas.

Además al degradar la lignina del sustrato, aumenta la digestibilidad de la fibra y el contenido de proteína cruda del SMS, lo que lo convierte en un candidato viable como complemento alimenticio. Ensayos han reportado que la inclusión de 10-30 % de SMS en dietas para vacas, ovejas o búfalos mejora la digestión de forrajes y la ganancia de peso, aunque el consumo voluntario puede disminuir si el contenido de cenizas es elevado (Baptista et al., 2023). Además, el SMS aporta minerales como calcio, magnesio, zinc y hierro, así como polisacáridos y vitaminas del complejo B, lo cual puede fortalecer la salud intestinal e inmunológica del animal. Sin embargo, para especies monogástricas como aves y cerdos, es recomendable fermentar previamente el SMS para mejorar su palatabilidad y valor nutricional.

El SMS contiene enzimas extracelulares activas producidas durante la colonización micelial del sustrato, como lacasas, celulasas, xilasas y peroxidasas. Estas enzimas pueden extraerse mediante sistemas acuosos, filtración por membranas o cromatografía, con altos rendimientos de recuperación. Por ejemplo, se ha documentado una recuperación del 95 % de lacasa utilizando sistemas bifásicos. Estas enzimas tienen aplicaciones industriales en la remediación de efluentes textiles, la producción de bioetanol y el desarrollo de biocatalizadores para celdas de combustible. Asimismo, tienen una gran cantidad de β-glucanos y compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas, de interés en la industria farmacéutica y cosmética. La recuperación de estos compuestos representa una estrategia de “bio-minería” que permite agregar valor al residuo antes de su disposición o uso agronómico.

En su forma sólida, puede ser pelletizado junto con aserrín en proporciones del 20-30 %, alcanzando densidades superiores a 1 100 kg/m³ y valores caloríficos de hasta 17 MJ/kg. Dando valor para que pueda ser utilizarlo como materia prima para la producción de energía térmica y biocombustibles. Además, su bajo contenido en lignina y la acción previa de enzimas durante el cultivo facilitan la liberación de azúcares fermentables, haciendo viable su uso para la producción de bioetanol de segunda generación, con rendimientos de hasta un 87 % (Phan y Sabaratnam, 2012). También se ha utilizado en digestión anaerobia para la generación de biogás, logrando niveles de producción comparables al estiércol bovino. Estas aplicaciones energéticas ofrecen una alternativa sostenible para el manejo de

grandes volúmenes de SMS, especialmente en regiones con acceso limitado a fuentes fósiles.

En investigaciones recientes destacan el interés en el uso del SMS como materia prima para la fabricación de materiales biodegradables con aplicaciones en el área de biofabricación y construcción sostenible. Se ha evaluado su incorporación en la producción de bloques prensados, paneles aislantes, tableros aglomerados y biocompuestos lignocelulósicos, aprovechando su alto contenido de fibras vegetales, su estructura porosa y la presencia de micelio como aglutinante natural. Estas propiedades han permitido estudiar este material como sustitución del poliestireno expandido (duroport) para ser utilizado como embalajes industriales, ya que ofrecen propiedades similares de absorción de impactos, aislamiento térmico y acústico, bajo peso, baja conductividad térmica y buena resistencia estructural cuando es prensado y secado adecuadamente. Estas aplicaciones emergentes abren una nueva ruta de valorización para este subproducto agroindustrial.

Figura 12. Ejemplos de aplicaciones del micelio gastado



Nota. Ejemplos de aplicaciones del micelio gastado en distintos sectores: empaques sostenibles, Fungipor, 2025; calzado con materiales de micelio, Adidas, 2025; y biopaneles para construcción, Leet, 2022.

En este contexto, el aprovechamiento del SMS representa una estrategia innovadora que se alinea con los principios de la bioeconomía circular, al transformar un residuo agroindustrial en múltiples productos de valor agregado. Este enfoque integra la sostenibilidad ambiental, social y económica: ambiental, al disminuir el impacto de la disposición inadecuada de residuos y al abrir nuevas oportunidades en la producción de alimentos funcionales y materiales sostenibles que pueden beneficiar a comunidades rurales; y económico, al diversificar las cadenas productivas mediante la generación de insumos. Actualmente, países desarrollados como Estados Unidos, Alemania, Países Bajos y China ya han impulsado una industria consolidada alrededor del SMS, con aplicaciones en biofertilizantes, biocombustibles, bioplásticos y bioconstrucción, lo que demuestra la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento. Estas experiencias confirman que el SMS no solo posee un gran potencial en investigación, sino también en escalabilidad industrial, integrándose como parte de un modelo productivo que busca cerrar ciclos y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos. seguridad alimentaria y promover un desarrollo sostenible basado en la economía circular.

VI. Metodología

6.1 Equipos

- Olla
- Estufa eléctrica
- Balanza digital
- Balanza de humedad
- Termómetro digital
- Higrómetro

6.2 Materiales

- Pulpa de café
- Paja
- Micelio de *Pleurotus ostreatus*
- Cubetas de plástico
- Nylon transparente
- Guantes resistentes al calor
- Guantes estériles
- Atomizador con agua purificada

6.3 Reactivos

- Alcohol isopropílico al 95%
- Agua destilada

6.4 Procedimiento

a. Tamaño de muestra

Se establecieron previamente los parámetros de trabajo necesarios para el cálculo del tamaño de muestra, incluyendo el tamaño de la población (N), el nivel de confianza (Z), la desviación estándar (S) y la precisión absoluta deseada (d). El cálculo se realizó aplicando la ecuación para población finita, ver Ecuación 5. Considerando la pulpa de café producida diariamente en la finca como población de estudio. Ver Cálculo 1.

b. Obtención del sustrato

- Recolección y secado de la pulpa de café
 - Se recogió la pulpa de café directamente del proceso de despulpado.
 - Se secó la pulpa al sol indirectamente durante dos días para reducir el exceso de humedad, sin provocar un secado total.
 - Este procedimiento buscó evitar el escurrimiento de agua durante su almacenamiento y transporte, manteniendo una consistencia manejable sin comprometer la integridad del sustrato.

c. Caracterización fisicoquímica del sustrato

- Se tomó tres muestras de 454 g de pulpa de café y paja, y fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de Anacafé - Analab.
- Se realizó el análisis de abono orgánico O-1 en cada muestra. Los análisis se realizaron bajo los estándares de calidad acreditados según la norma ISO/IEC 17025:2017 de la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2017), con base en el documento OGA-LE-087-18 (Oficina Guatemalteca de Acreditación [OGA], 2024). Los parámetros evaluados y los métodos empleados fueron los siguientes:
 - pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo : Agua.
 - Nutrientes esenciales
 - Nitrógeno (N): Determinado mediante el método de Dumas.
 - Fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) y boro (B): digestión ácida con microondas y lectura por medio de Espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente – ICP/OES.
 - Ceniza, Carbono orgánico (C.O.) y Materia orgánica (M.O.) analizados mediante el método gravimétrico.
 - Relación carbono/nitrógeno (C/N)

d. Preparación del sustrato

- Esterilización
 - Inmersión en agua caliente
 - Se colocó cada sustrato (pulpa de café y paja) en su respectiva una olla.
 - Se agregó suficiente agua hasta que los sustratos estén completamente sumergidos.
 - Se mantuvo la temperatura a 60°C durante un período de 2 horas para asegurar la completa esterilización.
 - El agua fue drenada cuidadosamente después de completar el proceso de esterilización.
 - Se colocó un nylon limpio sobre una mesa y se desinfectó la superficie con alcohol isopropílico al 95%.
 - El sustrato fue extendido sobre la superficie desinfectada para enfriarlo y permitir que perdiera el exceso de humedad.
 - Se realizó el análisis de humedad utilizando una balanza de humedad programada a 105°C, con una pérdida de peso estable de 1 mg/min como criterio de finalización.
 - Una vez frío y con una humedad inferior al 70%, se procedió a la inoculación del micelio. Este paso es crucial, ya que si el sustrato aún se encuentra caliente o hay un exceso de humedad, esto puede comprometer su desarrollo.

e. Preparación de las cubetas para el cultivo

- Se seleccionó cubetas de 5L de capacidad.

- Se realizó orificios de 2 cm de diámetro de forma alternada siguiendo un patrón a tresbolillo (· : · : · : · :), con una distancia de 7.5 cm entre cada agujero. Adaptando las recomendaciones de Sayner (2021). En total, cada cubeta cuenta con 12 agujeros.

Figura 13. Detalle de cubeta perforada para el cultivo de hongos



Nota. Elaboración propia.

f. Inoculación del Micelio

- Se desinfectó el área de trabajo y las herramientas con alcohol isopropílico al 95%.
- Cada cubeta fue desinfectada y sus agujeros se mantuvieron tapados inicialmente para evitar la entrada de aire.
- Se llenó cada cubeta con 1.5 kg de sustrato húmedo según la mezcla correspondiente. Las diferentes mezclas de pulpa de café y paja se prepararon en las siguientes proporciones:
 - 100% pulpa de café
 - 100% paja.
 - 50/50 (pulpa de café/paja).
 - 70/30 (pulpa de café/paja).

La selección de las proporciones de mezcla se fundamentó en los antecedentes y en el objetivo de aprovechar la pulpa de café en mayor medida. Siguiendo estas referencias, se incluyeron los extremos de sustratos puros, ya que constituyen un punto de comparación habitual en estudios de hongos comestibles. La mezcla 50/50 se consideró como base intermedia reportada en la literatura, mientras que la proporción 70/30 se planteó como un escenario adicional con mayor contenido de pulpa, con el propósito de incrementar su aprovechamiento y reducir la cantidad de residuo agroindustrial desechado.

- Se añadió 0.30 kg de micelio correspondiente al 20% de micelio de *Pleurotus ostreatus*, compactando capa por capa.
- Se selló cada cubeta para evitar la entrada de aire.

g. Incubación

- Las cubetas se colocaron en un ambiente oscuro con ventilación.

- Se mantuvo la temperatura entre 24-25°C y una humedad relativa del 75 -85%.
- Se verificó progresivamente hasta que el micelio colonizara completamente el sustrato. Si se presentaba algún color verde, negro u otro signo de contaminación, las cubetas deberían ser desechadas.
- Las cubetas fueron incubadas durante 7 días este fue el tiempo en que el micelio colonizó completamente el sustrato, volviendolo completamente blanco (Ver Figura 31), con esto se pasó a la etapa de fructificación.

h. Fructificación

- Se destapó cada agujero de las cubetas para exponer el sustrato al oxígeno.
- Los bloques fueron colocados estanterías cubiertas con plástico tipo nylon con el objetivo de protegerlas de posibles contaminaciones externas y mantener una humedad relativa adecuada. El ambiente de cultivo se mantuvo con luz difusa, una temperatura controlada entre 20–25 °C y una humedad relativa entre 75–85%.El montaje permite la apertura del plástico para asegurar una ventilación adecuada. (Figura 32).
- Cada agujero se humedeció frecuentemente con agua purificada a temperatura ambiente, al menos dos veces al día, para evitar que el sustrato se secase.
 - En cubetas que no presentaron signos de fructificación después de 15 días, se aplicó un shock térmico sumergiéndolas en agua fría a 15°C durante 12 horas para inducir la producción de primordios.
 - Luego del shock térmico, las cubetas fueron drenadas para eliminar cualquier exceso de agua y posteriormente se volvieron a colocar en las mismas condiciones de temperatura (20-28°C) y humedad (70-85%).
 - Se continuó con el monitoreo regular de humedad y temperatura, asegurando las condiciones de fructificación.
 - Tras la aplicación del shock térmico, las cubetas comenzaron a mostrar signos de fructificación aproximadamente 5 días después.

Figura 14. Control de la temperatura promedio durante el periodo experimental

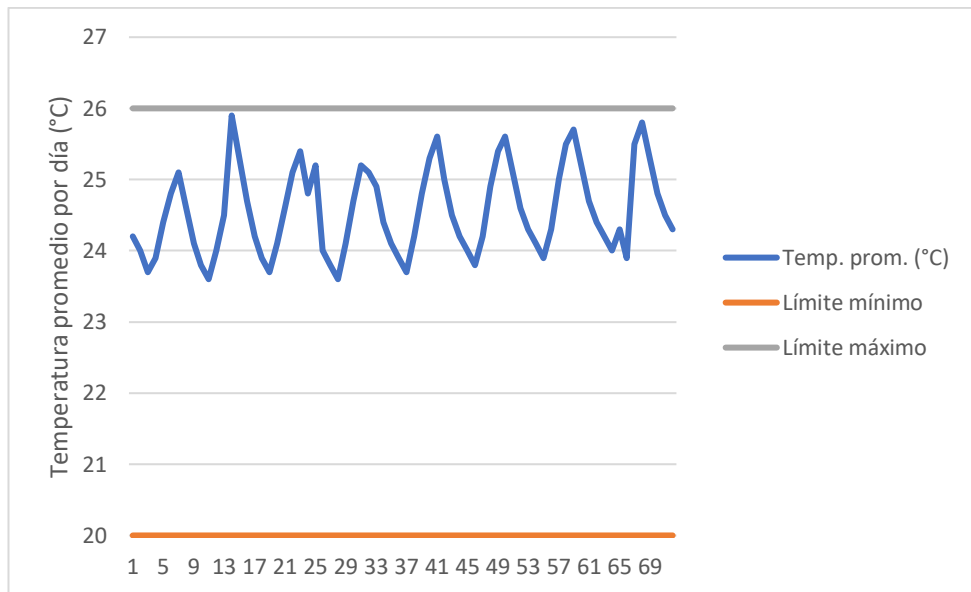
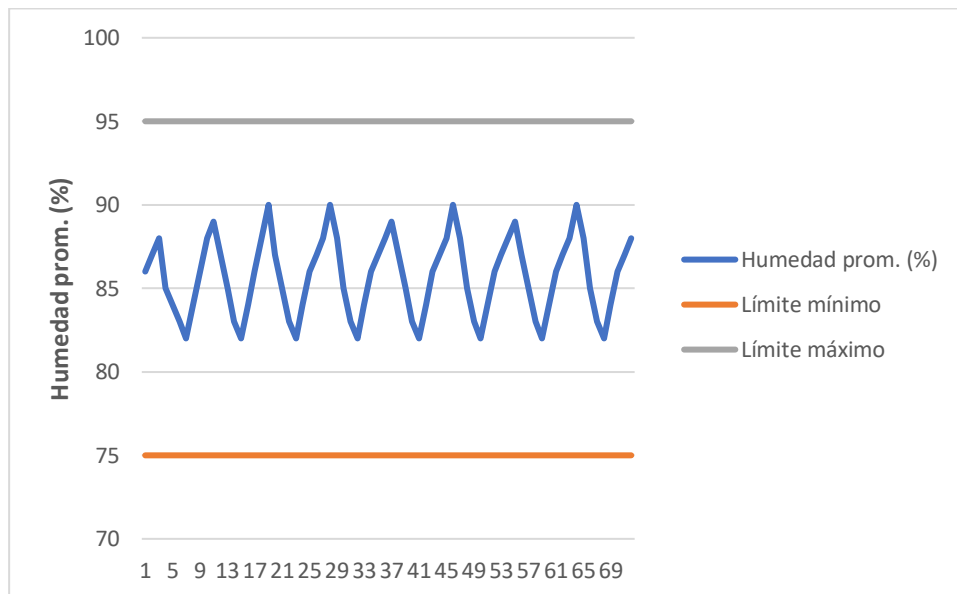


Figura 15. Control de la humedad relativa promedio del ambiente durante el periodo experimental



En las figuras 14 y 15 se presenta el control de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente promedio durante el periodo experimental de fructificación. Los valores registrados se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Este manejo permitió asegurar un ambiente favorable para la formación de primordios y el desarrollo de los cuerpos fructíferos, minimizando el estrés fisiológico del micelio.

i. Cosecha

- Desarrollo de los cuerpos fructíferos
 - Los cuerpos fructíferos comenzaron a desarrollarse aproximadamente 12 días después de la fructificación.
 - Se verificó que los hongos presentaran bordes del sombrero planos u ondulados, lo que indicaba su madurez óptima.
 - Los hongos fueron cosechados girándolos suavemente con guantes y desprendiéndolos de la base del sustrato.
 - Una vez cosechados, los hongos fueron pesados para registrar su masa.

- Subsecuentes cosechas
 - Después de la primera cosecha, se limpiaron los residuos de hongos del agujero.
 - Se repitió el proceso de humidificación y monitoreo.
 - Las siguientes cosechas ocurrieron aproximadamente de 10-15 días después de la anterior.
 - Se repitió el procedimiento de cosecha de hongos, registrando el peso y las dimensiones de los cuerpos fructíferos obtenidos en cada oleada productiva.
 - Monitorear el bloque de cultivo tras cada cosecha. El ciclo productivo se considera finalizado cuando:
 - El bloque ha producido entre 2 y 3 cosechas.
 - El tiempo de espera entre oleadas aumenta considerablemente y la producción de hongos se reduce.
 - Los hongos que emergen son pequeños, deformes o secos, lo cual indica agotamiento del sustrato. (Ver Figura 46)
 - Se observa la aparición de contaminantes como mohos.
 - El bloque presenta alta compactación, pérdida significativa de peso o se desprende completamente de la cubeta. Tal como se muestra en la Nota. Elaboración propia.
 - Figura 50, el bloque puede presentar cambios visibles en su estructura.
 - Una vez terminada la cosecha se realizó el análisis de humedad al sustrato residual de cada cubeta utilizando una balanza de humedad programada a 95 °C, con una pérdida de peso estable de 1 mg/min como criterio de finalización. Esta temperatura fue seleccionada para evitar la descomposición térmica los restos de micelio, presentes en el sustrato después de las oleadas de producción.

j. Evaluación de producción de *Pleurotus ostreatus*

Una vez terminado el ciclo productivo, se calcularon las diferentes variables del proceso, las cuales están relacionadas con el rendimiento productivo. Estas son:

- Rendimiento biológico: en el ámbito del cultivo de hongos, este parámetro se conoce como eficiencia biológica.

$$RB = \frac{PFto}{PSS}$$

- Tasa de producción: expresa el porcentaje de rendimiento biológico obtenido por día.

$$T_p = \frac{RB}{PP} \cdot 100$$

- Precocidad: intervalo promedio en días entre las oleadas productivas

$$P_{cd} = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_n)}{NO}$$

- Tasa de biodegradación del sustrato: porcentaje de sustrato húmedo degradado al finalizar el ciclo respecto al valor inicial.

$$B_s = \frac{(PSH_{ini} - PSH_{fin})}{PSH_{ini}} \cdot 100$$

Para más detalles, consulte la sección II.e en la página 36.

k. Uso poscosecha

- Si el bloque está contaminado con mohos u otros patógenos, desecharlo como basura orgánica.
- Si el sustrato residual no presenta signos visibles de contaminación tras el ciclo productivo, puede considerarse su reutilización en diferentes aplicaciones alternativas. Para más detalles, consulte la Sección 5.14. En la Figura 52 se observa en una prueba preliminar realizada con el sustrato agotado, en la cual se observó que, puede ser compactado formando un bloque, sin fracturas visibles.

VII. Resultados

a. Análisis fisicoquímico de los sustratos para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Cuadro 8. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala

| Parámetro | | Promedio | Desviación estándar |
|----------------------|----------------------|----------|---------------------|
| % (m/m) Base seca | Nitrógeno (N) | 1.80 | 0.04 |
| | Fósforo (P_2O_5) | 0.38 | 0.03 |
| | Potasio (K_2O) | 5.07 | 0.26 |
| | Calcio (CaO) | 0.82 | 0.04 |
| | Magnesio (MgO) | 0.18 | 0.01 |
| | Azufre (S) | 0.12 | 0.01 |
| ppm | Hierro (Fe) | 34.41 | 7.61 |
| | Manganeso (Mn) | 8.96 | 0.82 |
| | Cinc (Zn) | 5.78 | 0.21 |
| | Cobre (Cu) | 11.55 | 1.10 |
| | Boro (B) | 32.38 | 1.34 |
| pH | | 6.78 | 0.55 |
| Relación C/N | | 28.15 | 0.85 |
| % (m/m) Base seca | Cenizas | 9.00 | 1.00 |
| | Materia Orgánica | 91.00 | 1.00 |
| | Carbono Orgánico | 50.55 | 0.56 |

Nota. Anacafé, 2025.

Cuadro 9. Caracterización fisicoquímica de la paja

| Párametro | | Promedio | Desviación estándar |
|----------------------|----------------------|----------|---------------------|
| % (m/m) Base seca | Nitrógeno (N) | 0.81 | 0.22 |
| | Fósforo (P_2O_5) | 0.13 | 0.04 |
| | Potasio (K_2O) | 2.35 | 0.17 |
| | Calcio (CaO) | 0.32 | 0.11 |
| | Magnesio (MgO) | 0.13 | 0.03 |
| | Azufre (S) | 0.10 | 0.01 |
| ppm | Hierro (Fe) | 391.90 | 9.13 |
| | Manganeso (Mn) | 90.74 | 25.97 |
| | Cinc (Zn) | 16.09 | 4.06 |
| | Cobre (Cu) | 12.11 | 7.20 |
| | Boro (B) | 3.86 | 0.30 |
| pH | | 8.47 | 0.03 |
| Relación C/N | | 61.33 | 33.01 |
| % (m/m) Base seca | Cenizas | 8.33 | 1.53 |
| | Materia Orgánica | 91.67 | 1.53 |
| | Carbono Orgánico | 50.92 | 0.85 |

Nota. Anacafé, 2025.

b. Rendimiento de las mezclas de sustrato

Cuadro 10. Rendimiento biológico (RB) promedio de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla de sustrato | Masa del sustrato seco ($\pm 0.02kg$) | Masa de hongos cosechados ($\pm 0.001 kg$) | Rendimiento biológico $\left(\frac{kg\ hongos}{kg\ sustrato\ seco}\right)$ |
|--------------------|---|--|--|
| 100% pulpa de café | 0.58 | 0.705 | 1.21 \pm 0.066 |
| 100% paja | 0.59 | 0.507 | 0.96 \pm 0.051 |
| 70% pulpa/30% paja | 0.59 | 0.804 | 1.36 \pm 0.053 |
| 50% pulpa/50% paja | 0.60 | 0.608 | 1.01 \pm 0.073 |

Cuadro 11. Análisis ANOVA de un factor para el parámetro de rendimiento biológico de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

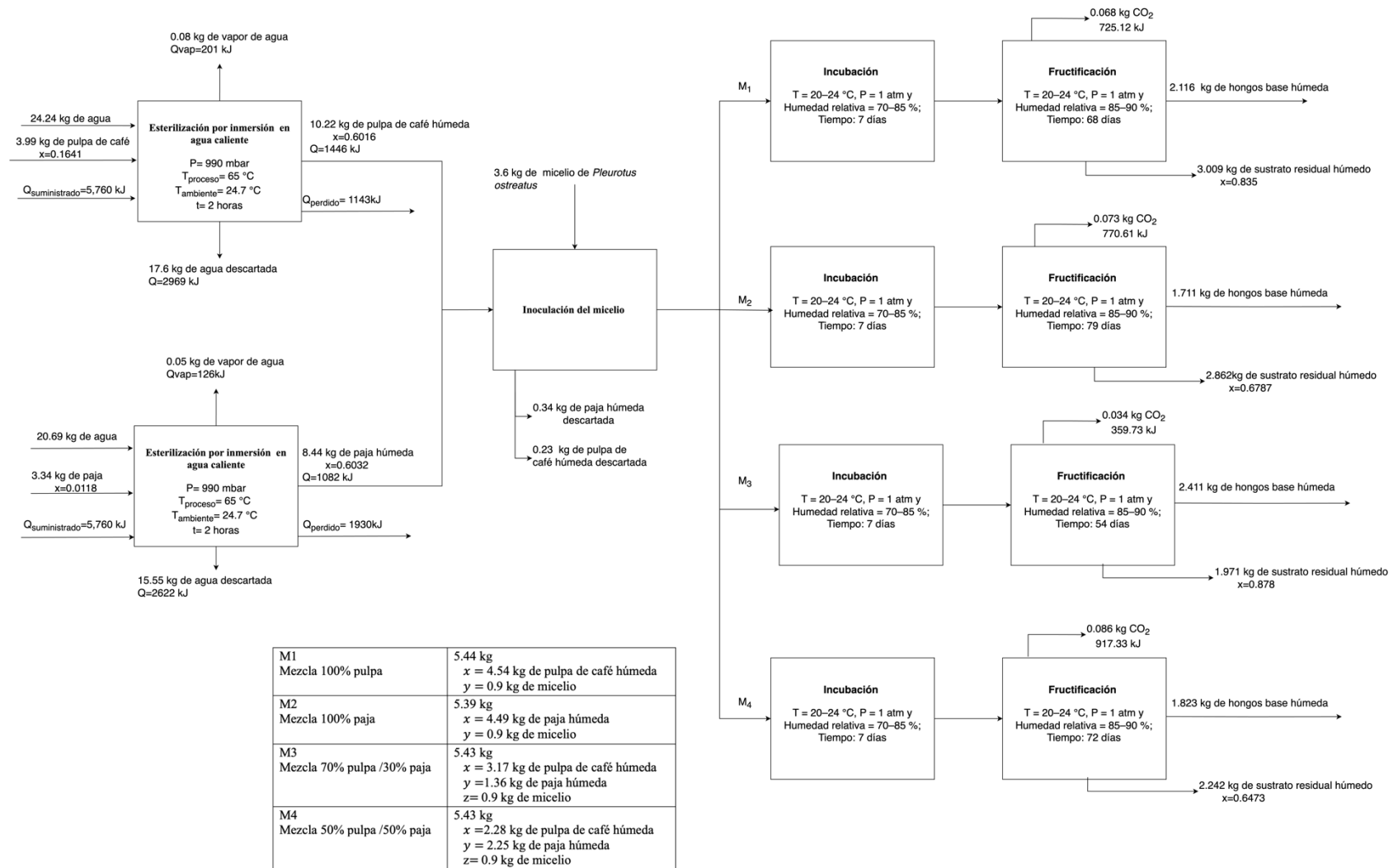
| Origen de variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | Valor F | Probabilidad | Valor crítico F |
|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------|------------------------|-----------------|
| Entre grupos | 0.3004 | 3 | 0.1001 | 329.75 | 1.016x10 ⁻⁸ | 4.07 |
| Dentro de los grupos | 0.0024 | 8 | 0.0003 | | | |
| Total | 0.3028 | 11 | 0.0275 | | | |

Cuadro 12. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la rendimiento biológico de *Pleurotus ostreatus* en distintas mezclas de sustrato

| Mezcla | Diferencia de medias | Error estándar (SE) | $Q_{\text{calculado}}$ | $Q_{\text{crítico}}$ | p-valor | Conclusión |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------|
| x1 – x2 | 0.2497 | 0.01006 | 24.82 | 5.51 | 5.273×10^{-7} | Diferencia significativa |
| x1 – x3 | 0.1453 | | 14.45 | | 3.378×10^{-5} | Diferencia significativa |
| x1 – x4 | 0.1993 | | 19.81 | | 3.132×10^{-6} | Diferencia significativa |
| x2 – x3 | 0.3950 | | 39.26 | | 1.578×10^{-8} | Diferencia significativa |
| x2 – x4 | 0.05033 | | 5.00 | | 0.0313 | No hay diferencia significativa |
| x3 – x4 | 0.3447 | | 34.26 | | 3.271×10^{-8} | Diferencia significativa |

Codificación: x1 = 100 % pulpa de café, x2 = 100 % paja, x3 = 70 % pulpa / 30 % paja, y x4 = 50 % pulpa / 50 % paja.

Figura 16. Balance de masa y energía del cultivo de *Pleurotus ostreatus* con diferentes mezclas de sustrato

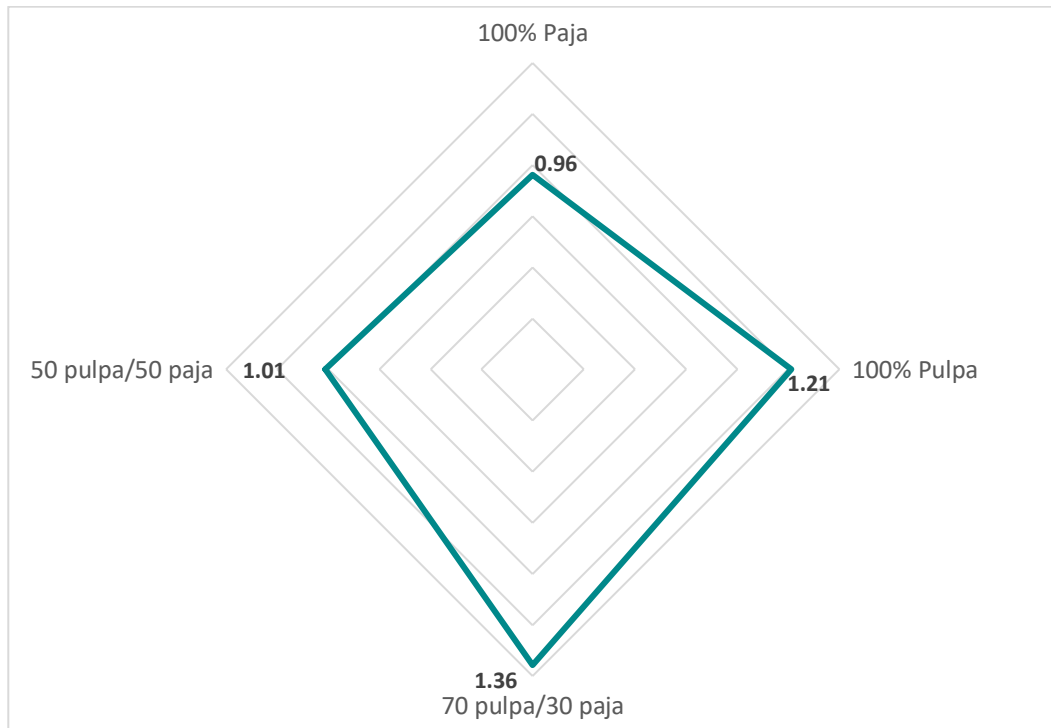


c. Comparación de los parámetros de rendimiento productivo de *Pleurotus ostreatus* en cada mezcla de sustrato

Cuadro 13. Resultados promedio de los parámetros de producción de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

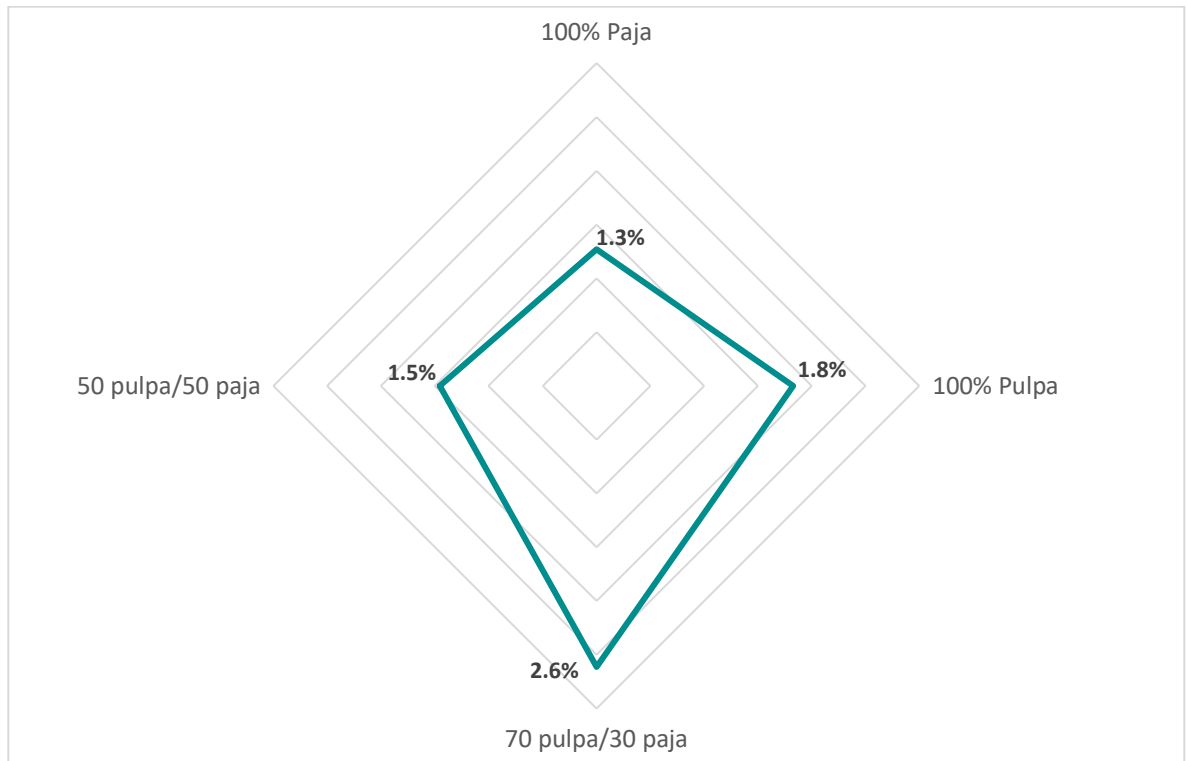
| Mezcla de sustrato | Rendimiento biológico $\left(\frac{kg\ hongos}{kg\ sustrato\ seco}\right)$ | Tasa de producción $\left(\frac{\%}{día}\right)$ | Tasa de biodegradación del sustrato en base húmeda (%) |
|--------------------|---|---|--|
| 100% pulpa de café | 1.21±0.066 | 1.83±0.066 | 33.60±0.019 |
| 100% paja | 0.96±0.051 | 1.27±0.051 | 36.15±0.028 |
| 70% pulpa/30% paja | 1.36±0.053 | 2.61±0.053 | 56.50±0.026 |
| 50% pulpa/50% paja | 1.01±0.073 | 1.45±0.073 | 50.51±0.025 |

Figura 17. Comparación de la rendimiento biológico de *Pleurotus ostreatus* en distintas mezclas de sustrato



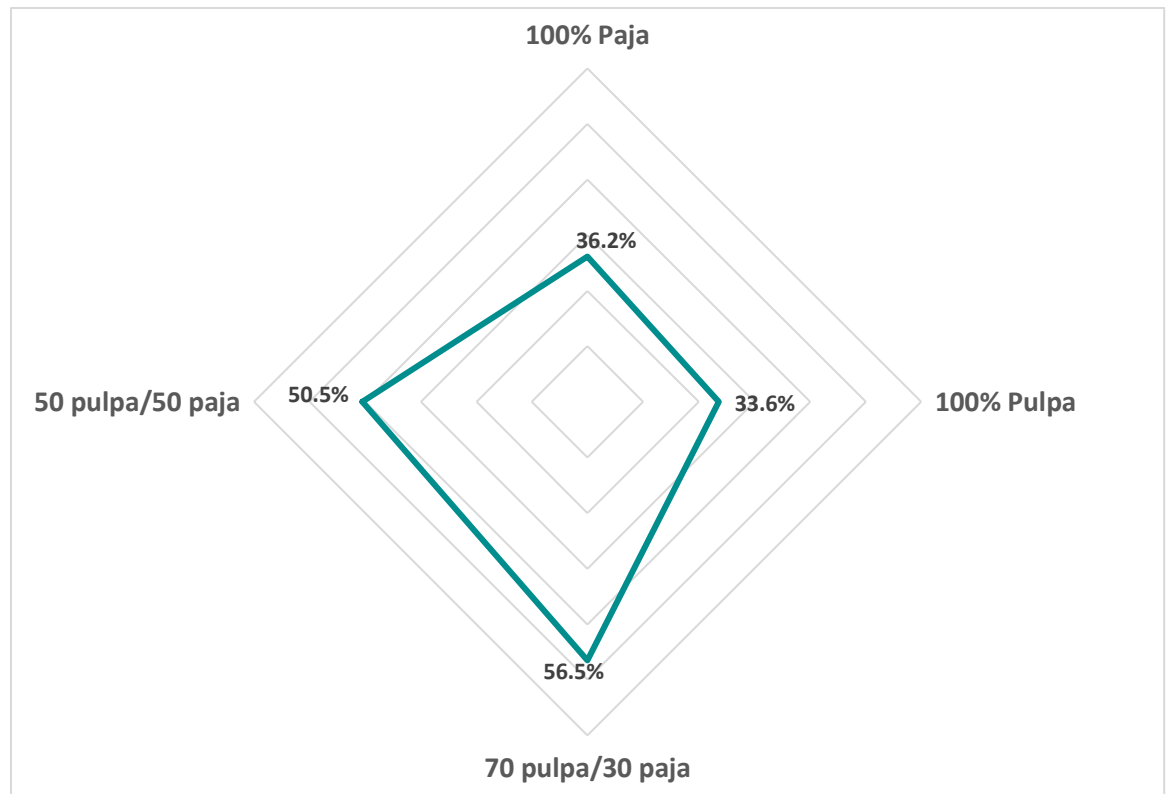
Nota. Elaboración propia.

Figura 18. Comparación de la tasa de producción (Tp) de *Pleurotus ostreatus* en distintas mezclas de sustrato



Nota. Elaboración propia.

Figura 19. Comparación de la tasa de biodegradación del sustrato (Bs) en diferentes mezclas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

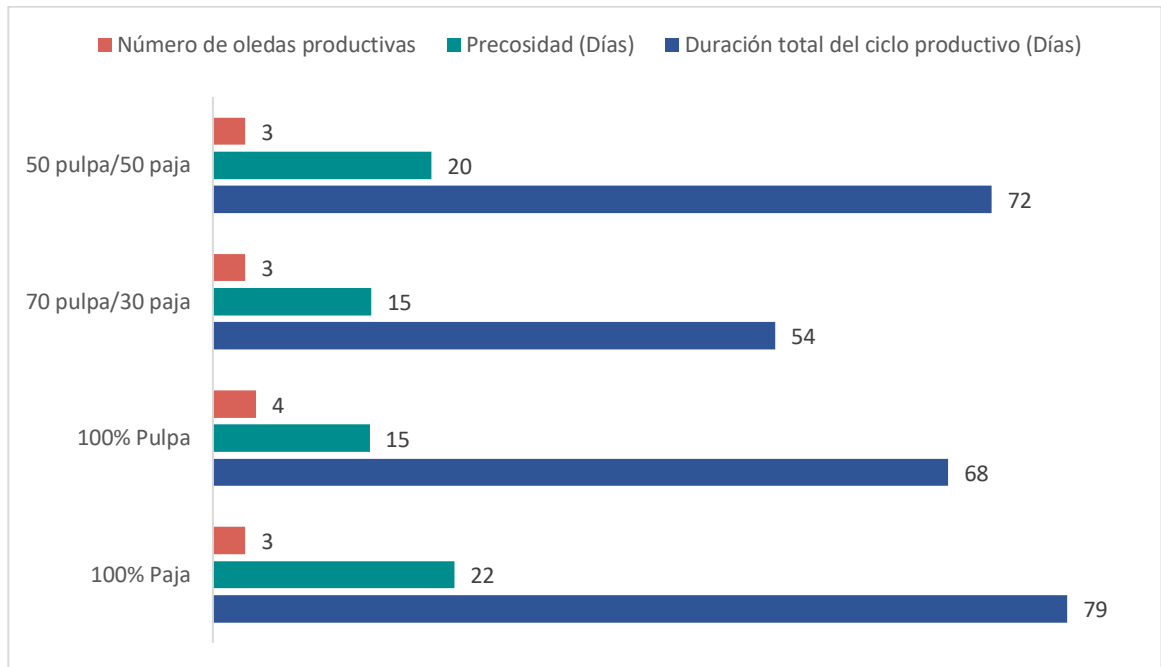


Nota. Elaboración propia.

Cuadro 14. Parámetros temporales del ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla de sustrato | 100% Pulpa | 100% Paja | 70% pulpa/30% paja | 50% pulpa/50% paja |
|--|------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Duración total del ciclo productivo (Días) | 67 | 79 | 54 | 72 |
| Precosidad (Días) | 15 | 23 | 15 | 21 |
| Número de oledas productivas | 4 | 3 | 3 | 3 |

Figura 20. Comparación de los parámetros temporales del ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato



Nota. Elaboración propia.

VIII. Análisis de resultados

La creciente demanda de alimentos nutritivos y funcionales, frente a la limitada disponibilidad de recursos, ha evidenciado la necesidad de promover producción y consumo responsables, que permitan satisfacer las necesidades de la población de manera sostenible. La producción de hongos comestibles se posiciona como una alternativa relevante, ya que no solo aporta alimentos de alto valor nutricional, sino que también promueve el aprovechamiento de residuos agroindustriales bajo un enfoque de economía circular. Entre estos residuos la pulpa de café es uno de los subproductos más abundantes generados por la industria cafetalera en Guatemala; se trata de un material lignocelulósico con potencial de aprovechamiento, cuyo uso puede contribuir a reducir los impactos ambientales y fomentar la economía circular.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo aprovechar la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala como sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra), proponiendo una alternativa sostenible para la gestión de este residuo agroindustrial.

En Guatemala existe una amplia diversidad de pulpas de café incluso dentro de la misma especie, diversas investigaciones han demostrado que factores como la temperatura media diaria, el tipo de suelo, la altitud, los microclimas locales y los métodos de procesamiento influyen en parámetros del grano verde de *Coffea arabica*, tales como el contenido de humedad y el pH (Mengesha et al., 2024). Estas variaciones pueden extenderse también a la pulpa, dado que ambos tejidos están fisiológicamente relacionados. Huehuetenango pertenece a la región Occidental de Guatemala y se caracteriza por un clima subtropical de alta montaña, con un régimen de precipitación menor que otras zonas cafetaleras, además de vientos cálidos provenientes de México que ejercen un efecto termorregulador y protegen los cultivos. Las altitudes de la región oscilan entre 1,500 y 2,000 m s. n. m., alcanzando en algunos casos elevaciones superiores. Estas condiciones favorecen una maduración lenta y uniforme de los frutos, lo que se refleja en granos de mayor densidad y en una composición más compleja de carbohidratos y azúcares (Anacafé, 2021).

La pulpa empleada se obtuvo de una finca localizada en el departamento de Huehuetenango. Por esta razón, se determinó la capacidad de la pulpa de café como sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (*P. ostreatus*), a través de un análisis fisicoquímico que proporcionó información sobre la calidad del sustrato, en términos de su composición nutricional y parámetros de crecimiento. Este procedimiento resulta necesario para ajustar las condiciones de cultivo en cada caso y para determinar si el sustrato favorecerá el crecimiento del hongo, considerando que los hongos requieren una fuente de carbono y nitrógeno, un pH ligeramente ácido a neutro para la formación de cuerpos fructíferos. De igual forma, se llevó a cabo el análisis en la paja, ya que es el sustrato más comúnmente utilizado en la actualidad para la producción de hongos comestibles. Las pruebas fueron realizadas por el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de Anacafé (Analab), bajo estándares de calidad acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025:2017. Se determinaron macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) expresados en % (m/m), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B) en ppm, así como parámetros generales de composición: carbono orgánico % (m/m), pH y relación C/N.

Durante el análisis de los datos correspondientes a la paja, se identificaron posibles valores atípicos. Por ello, se envió una muestra adicional al laboratorio y se aplicó la prueba Q de Dixon (Cuadro 48) a los valores de C/N, Cu, Fe, Mn, carbono orgánico, cenizas y materia orgánica, para evitar que mediciones anómalas afectaran el cálculo de los promedios y la comparación entre sustratos. Esta prueba permitió descartar los valores extremos de Fe, carbono orgánico, cenizas y materia orgánica, por ser considerados atípicos bajo un nivel de confianza del 95%. En el caso de la relación C/N, Cu y Mn, los valores extremos fueron evaluados, pero no superaron el valor crítico, por lo que se conservaron en el análisis.

Una vez depurada la información analítica, resulta pertinente contextualizar la paja no solo desde sus resultados químicos, sino también desde su función como materia prima dentro del sistema de cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Esta puede provenir de distintas especies vegetales; sin embargo, la paja de trigo es la más utilizada, seguida por la de cebada y avena, debido a su disponibilidad, estructura fibrosa y comportamiento favorable durante la colonización micelial. La paja de arroz también puede utilizarse; no obstante, presenta una estructura más dura y fibrosa, lo que puede dificultar su degradación y requerir un mayor esfuerzo metabólico por parte del hongo.

Independientemente de su origen, la paja debe encontrarse libre de tierra, barro y material mineral adherido, ya que estos pueden afectar la porosidad del sustrato y favorecer la presencia de contaminantes. Visualmente, se prefiere paja de color dorado o amarillento, indicativo de un secado adecuado posterior a la cosecha; la paja verde suele asociarse a un secado incompleto y a una mayor probabilidad de contaminación microbiológica. Asimismo, es fundamental que no presente signos de moho o putrefacción, tales como manchas negras o verdosas y olores desagradables. Tras la trilla, resulta necesario proteger el material de la humedad ambiental para conservar su integridad estructural y reducir riesgos de contaminación, es por eso que debe ser almacenada en condiciones secas y protegidas de la lluvia. En cuanto a su forma física, la paja se utiliza generalmente en fragmentos, ya que el tamaño de partícula influye en la porosidad. Aunque no existe una granulometría definida, se considera un corte aproximado entre 5 y 10 cm, el cual permite mantener una estructura.

En el Cuadro 8 se encuentran los resultados de la caracterización fisicoquímica para la pulpa de café (*Coffea arabica*) y en el Cuadro 9 para la paja de trigo, junto con sus desviaciones estándar. Empezando con los porcentajes de macronutrientes, los materiales lignocelulósicos suelen presentar bajos niveles de estos elementos, característica que se deriva de su composición estructural, ya que la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, que constituyen las fracciones mayoritarias, mientras que las proteínas, lípidos y otros nutrientes se encuentran proporciones menores (Bobková et al., 2022). En el caso de la paja, se trata de un tejido diseñado principalmente para el soporte estructural, en el cual los nutrientes van hacia los granos directamente. En contraste, la pulpa de café corresponde a las capas externas del fruto, actuando como una reserva activa que acumula nutrientes para el desarrollo del grano, el cual se encuentra en su interior.

La pulpa de café presentó concentraciones más altas y con baja variabilidad en los macronutrientes analizados, con valores 1.8 % (m/m) para nitrógeno de y 5.07 % (m/m)

para potasio, ambos necesarios para el metabolismo del hongo. El nitrógeno participa en la síntesis de proteínas y enzimas relacionadas con la formación de biomasa (Sales-Campos et al., 2009), mientras que el potasio interviene en el transporte y la distribución de nutrientes, lo que incide en su absorción y disponibilidad (Garuba et al., 2017). En el caso de la paja, las concentraciones fueron menores en todos los elementos medidos. De acuerdo con Carrasco et al. (2018), los sustratos pueden enriquecerse con compuestos minerales, aunque su concentración debe controlarse para evitar alterar el pH del medio y provocar saturaciones que no necesariamente se reflejen en mejoras productivas. Por ello, en el cultivo de hongos comestibles se emplean con frecuencia mezclas de materiales lignocelulósicos con diferentes propiedades químicas y físicas, usualmente en proporciones similares, aunque su formulación debería definirse en función de la disponibilidad de nutrientes y de las condiciones estructurales de cada sustrato. De esta manera, al combinar materiales como la pulpa de café, con mayor compuestos asimilables, y la paja, que contribuye a la porosidad y aireación, se establece el suministro de nutrientes y las características físicas necesarias para la colonización y el desarrollo del micelio.

Los micronutrientes, aunque presentes en bajas concentraciones, desempeñan un papel para la síntesis de de enzimas que intervienen en la degradación del sustrato. Los más relevantes para el metabolismo de *P. ostreatus* son, boro, hierro y manganeso. Sin embargo, su acumulación pueden modificar características morfológicas o sensoriales de los cuerpos fructíferos, esto se debe a que los hongos obtienen sus nutrientes directamente a sus tejidos a través de la absorción micelial, permitiendo liberar enzimas que degradan la materia orgánica del sustrato, generando compuestos solubles como minerales y azúcares. Al no contar con mecanismos de regulación o filtración, si estos minerales están presentes en exceso, son incorporados directamente a la biomasa. De acuerdo con García et al. (1998), concentraciones elevadas de elementos como hierro, cobre o manganeso pueden alterar el sabor, la textura o el color del hongo. En este caso, la paja se presentó con concentraciones elevadas en hierro (391.90 ppm) y manganeso (90.74 ppm), lo que puede interferir en la disponibilidad relativa de otros nutrientes. Por otro lado, la pulpa de café el contenido de zinc y cobre fue menor; en cambio, la paja presentó concentraciones relativamente mayores de zinc (16.09 ppm) y cobre (12.11 ppm), aunque este último mostró una alta variabilidad, siendo de 7.20 ppm, lo que evidencia una variabilidad en la distribución del cobre dentro del sustrato. Además, se reportó un valor bajo de boro (3.86 ppm), lo que representa una baja disponibilidad de boro, elemento asociado al desarrollo micelial. Esto indica que la composición mineral de la pulpa de café difiere de la observada en la paja, lo cual es relevante considerar dentro de la formulación de sustratos para el cultivo del hongo para evitar desequilibrios que afecten la absorción y el metabolismo del hongo.

Otro parámetro relevante es el porcentaje de materia orgánica que, si bien fue similar entre ambos sustratos 91.67 % (m/m) en la paja y 91.00 % (m/m) en la pulpa de café). Sin embargo, su composición no es equivalente, ya que difiere en la proporción de carbohidratos, proteínas y otros componentes. Según Elias (1978), la pulpa de café contiene aproximadamente un 68% de carbohidratos, 15% de fibra, 9% de proteínas y 6.5% de cenizas. Esto indica una proporción considerable de azúcares solubles y proteínas, que pueden ser metabolizados por el hongo, ya que los carbohidratos proveen energía para el crecimiento estructural del micelio, mientras que las proteínas aportan nitrógeno necesario para la síntesis enzimática y celular. En cambio, la paja, aunque también presenta un alto

porcentaje de materia orgánica, está compuesta principalmente por fibras con menor contenido de azúcares y proteínas, lo que demanda una mayor actividad enzimática por parte del hongo para transformarlas en compuestos disponibles. (Chen et al., 2000).

En este estudio, el carbono se reportó como carbono orgánico total, dado que para el cultivo de hongos comestibles no solo resulta relevante la cantidad total de carbono presente en el sustrato, sino principalmente la forma en que este puede ser asimilado por el hongo. El crecimiento de *Pleurotus ostreatus* depende de su capacidad para degradar la materia orgánica compleja del sustrato y transformarla en compuestos más simples que puedan ser utilizados en su metabolismo. Por esta razón, no se realizó la diferenciación entre fracciones estructurales y no estructurales del carbono, ya que el objetivo del estudio fue comparar el comportamiento productivo del cultivo entre distintas mezclas de sustrato. No obstante, las diferencias en la naturaleza del carbono presente en cada residuo permiten interpretar las variaciones observadas posteriormente en los parámetros productivos.

Entre los parámetros más estudiados para el crecimiento de *P. ostreatus* destaca la relación carbono-nitrógeno (C/N) y el pH del sustrato. La relación carbono-nitrógeno (C/N) depende directamente del contenido de carbono orgánico y nitrógeno total presente en el sustrato. En este estudio, se observó que la pulpa de café posee un mayor contenido de nitrógeno, mientras que el porcentaje de carbono orgánico fue similar en ambos sustratos, ya que fue de 50.55 % (m/m) para la pulpa de café y 50.92 % (m/m) para la paja. El carbono constituye la principal fuente de energía para el hongo, mientras que el nitrógeno es indispensable para la síntesis de proteínas, enzimas y otros compuestos celulares. Según Bellettini et al. (2016), la relación C/N para el cultivo de esta especie de hongo se encuentra entre 20:1 y 30:1. En este sentido, la pulpa de café presentó una relación de (28.15), dentro del rango reportado para el cultivo de esta especie, mientras que la paja mostró una proporción elevada de (61.33), reflejando un exceso de carbono y limitación de nitrógeno; además, presentó una desviación estándar alta (33.01), lo que indica una gran variabilidad en su composición.

Relaciones C/N elevadas se asocian con una menor disponibilidad relativa de nitrógeno frente al carbono, lo cual, puede ralentizar el crecimiento del micelio, ya que la energía disponible tiende a destinarse al mantenimiento metabólico en lugar de al crecimiento y la formación de cuerpos fructíferos, lo que se traduce en un menor rendimiento biológico. Por el contrario, relaciones C/N bajas pueden dar lugar a una acumulación de amoníaco, compuesto que puede ser tóxico para el micelio debido a que eleva el pH del sustrato. (Elyson et al., 2024). Estas condiciones influyen en los procesos metabólicos del micelio y en la disponibilidad de compuestos simples derivados de la degradación del sustrato, los cuales son necesarios para sostener el crecimiento fúngico y la producción de cuerpos fructíferos.

Ahora, en cuanto al pH, este es importante para la regulación de las actividades enzimáticas, la solubilidad de los nutrientes y los procesos de transporte de los mismos. Según Jiang et al. (2025), el rango común para esta especie de hongo se encuentra entre 5.5-7. La pulpa de café presentó un pH de 6.78. Este valor se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para esta especie e indica que el pH permitirá mantener una actividad enzimática. Ya que el hongo no requiere destinar energía adicional a la

regulación del medio, lo cual incide en su desarrollo metabólico. En cambio, para la paja fue de 8.47, considerablemente más alcalino, lo que implica que el micelio debe destinar parte de su energía metabólica a regular el pH del medio, en lugar de emplearla en su crecimiento. Además, a este pH, varias enzimas clave para la degradación de compuestos estructurales como las celulasas, hemicelulasas y ligninasas su actividad puede verse reducida, lo que limita la capacidad del hongo para descomponer la paja y aprovecharla como fuente de nutrientes (Sözbir et al., 2015).

Uno de los principales retos al plantear el cultivo de hongos en subproductos agroindustriales es definir los parámetros que permiten comprender cómo la composición del sustrato influye en el desarrollo del micelio. En Guatemala, la información disponible sobre la pulpa de café es limitada y, hasta ahora, no se ha documentado su uso como sustrato para hongos mediante análisis técnicos. Las iniciativas existentes se concentran en experiencias prácticas de cooperativas o proyectos comunitarios, pero carecen de un respaldo científico que relacione las propiedades fisicoquímicas del material con el crecimiento fúngico. En este sentido, el cultivo de hongos requiere conocer las composiciones nutricionales del sustrato que sustentan el metabolismo del micelio.

En este contexto, el cultivo de hongos requiere conocer la composición nutricional del sustrato que sustenta el metabolismo del micelio; sin embargo, un mayor contenido de nutrientes también incrementa la susceptibilidad del sustrato a la contaminación microbiológica. Los sustratos húmedos y ricos en materia orgánica no solo favorecen el crecimiento del micelio, sino que también resultan propicios para el desarrollo de organismos competidores, como mohos y bacterias, los cuales suelen presentar tasas de crecimiento superiores a las del hongo cultivado. Desde un punto de vista de ingeniería de procesos, este comportamiento resalta la importancia de aplicar un tratamiento térmico que permita reducir la carga microbiana sin comprometer las condiciones fisicoquímicas necesarias para el crecimiento del hongo.

Por esta razón, la esterilización del sustrato constituye una práctica ampliamente empleada en estudios experimentales de cultivo de hongos, ya que reduce de forma significativa la carga microbiana y la presencia de esporas competidoras, otorgando una ventaja competitiva al micelio durante la fase de colonización (Grimm et al., 2024). Diversos autores señalan que el tratamiento térmico a temperaturas cercanas a la ebullición disminuye de manera efectiva los microorganismos competidores sin eliminar completamente la microbiota residual; no obstante, estos microorganismos remanentes no logran desarrollarse de forma significativa debido a la rápida colonización del sustrato por el micelio del hongo cultivado. El uso de agua caliente como medio de transferencia de calor permite una distribución térmica más uniforme dentro del sustrato, en comparación con métodos basados únicamente en vapor, y asegura simultáneamente un contenido de humedad compatible con la actividad metabólica del micelio. Esta condición resulta compatible con el crecimiento de *P. ostreatus*, especie reconocida por su alta capacidad competitiva frente a otros microorganismos bajo condiciones controladas (Shrestha et al., 2021).

Adicionalmente, este proceso contribuye a la hidratación del sustrato, lo cual favorece la colonización micelial y ha demostrado ser viable en aplicaciones a mediana escala. Tal

como se muestra en los Cuadro 24Cuadro 25, la pulpa de café y la paja presentaron valores de humedad cercanos al 60 % una vez finalizado el proceso de esterilización y después de que el sustrato fue enfriado a temperatura ambiente. *Pleurotus ostreatus* requiere niveles elevados pero controlados de humedad para un desarrollo adecuado del micelio; contenidos excesivos de agua libre pueden generar condiciones anaerobias, mientras que humedades bajas limitan su actividad metabólica.

Desde una perspectiva energética, la esterilización térmica por inmersión en agua genera corrientes de agua caliente residual que, en un escenario de escalamiento, podrían ser aprovechadas mediante esquemas de recuperación de calor, por ejemplo, para el precalentamiento de nuevos lotes de sustrato o del agua de proceso, reduciendo el consumo energético global del sistema.

A partir de la caracterización fisicoquímica, se determinó que tanto la pulpa de café como la paja pueden utilizarse como sustratos para el cultivo de *P. ostreatus*. La pulpa de café presentó diferencias en su composición, así como en la relación C/N y el pH respecto a la paja, parámetros que pueden influir en el rendimiento biológico. En el cultivo de hongos comestibles, la proporción entre materiales lignocelulósicos no responde a una relación fija, y con frecuencia se emplean mezclas 50/50 por su simplicidad operativa. Sin embargo, dado que el objetivo de este estudio se centró en el aprovechamiento de la pulpa de café como residuo agroindustrial principal, y considerando que este material presenta una relación C/N y un pH más compatibles con los requerimientos de *P. ostreatus*, se seleccionaron mezclas con una mayor proporción de pulpa, incorporando la paja como material estructural para mejorar la porosidad y la aireación del sustrato. Por ello, se desarrollaron cuatro mezclas de sustrato con distintas proporciones de pulpa y paja, con el objetivo de identificar, mediante el balance de masa, aquella que ofreciera el mayor rendimiento biológico.

Este análisis se enfocó en la etapa de fructificación, dado que en esta fase se concreta el aprovechamiento del sustrato en forma de cuerpos fructíferos, manteniéndose el seguimiento hasta el agotamiento del sustrato. Durante el ciclo productivo, las condiciones de temperatura y humedad relativa se registraron de forma continua, tal como se muestra en las Figura 14Figura 15. Los valores se mantuvieron dentro del intervalo establecido para el cultivo de *P. ostreatus*, lo que permitió controlar la influencia de variaciones ambientales externas. De esta manera, las diferencias observadas en los parámetros productivos y de biodegradación se asociaron principalmente a la composición del sustrato y no a cambios en las condiciones de cultivo.

Para esto, se utilizó el rendimiento biológico, definido como la proporción entre la masa de hongos cosechados en base húmeda y la masa de sustrato seco utilizada. Como se observa en el balance de masa, Figura 16, y en el Cuadro 10, la mezcla 70% pulpa/30% paja presentó la mayor rendimiento biológico promedio, seguida por 100% pulpa de café, luego la mezcla 50% pulpa/50% paja y, por último, la mezcla de 100% paja. Estos resultados indican que, si bien ambos sustratos permiten la producción de hongos, el rendimiento productivo varió entre las combinaciones. Por ello, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, con un nivel de significancia del 5%, para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre cada mezcla. Como se muestra

en el Cuadro 11, el valor F calculado (329.76) fue considerablemente mayor que el valor crítico de F (4.07). Esto indica que al menos una de las mezclas presenta un rendimiento significativamente distinto respecto a las demás, debido a la variación en la proporción de sustratos.

Al compararlas, se identificó que la paja presentó un bajo contenido de nitrógeno y macronutrientes, lo cual se asoció con un menor rendimiento; en estos casos suele emplearse suplementación de minerales para su uso exclusivo; en cambio, la pulpa de café mostró un mayor rendimiento, asociado a su mayor contenido de nutrientes; sin embargo, sus compuestos fenólicos pueden generar pueden interferir en algunos procesos metabólicos del hongo. A pesar de eso, la pulpa que solo fue esterilizada logró un rendimiento biológico de (1.21), que es incluso más alta que la registrada por Martínez-Carrera et al. (2000), quienes reportaron (1.133 de RB) con pulpa al 100%. En cuanto a las combinaciones, la mezcla 50 % pulpa / 50 % paja mostró una mejora en comparación con la paja pura, pero no superó el rendimiento de la pulpa sola. Esto se debe a que, aunque la paja mejora la estructura del sustrato, también diluye los nutrientes aportados por la pulpa. Por otro lado, la mezcla de 70 % pulpa y 30 % paja tuvo la mejor rendimiento biológico, con un valor de (1.36 ± 0.053) . Este resultado coincide con Salmones et al., 2004, quienes reportaron que el uso de cáscaras de frutos y aserrín como sustratos incrementa la producción y la rentabilidad, lo que muestra la utilidad de la pulpa de café como residuo agroindustrial en combinación con materiales estructurales como la paja.

Para confirmar estas diferencias, se realizó una prueba de Tukey, como se puede observar en el Cuadro 12, el cual reveló que la mezcla 100 % paja y 50/50 no son significativamente diferentes entre sí. Esto indica que el rendimiento de ambas fue similar, lo cual sugiere que un alto contenido de paja no mejora el rendimiento y se requiere una mayor proporción de pulpa en la mezcla para alcanzar mejoras productivas. Por otro lado, las mezclas con mayor proporción de pulpa presentaron rendimientos más altos y pero presentaron diferencia significativa entre sí; sin embargo, tampoco fueron estadísticamente similares a ninguna de las otras combinaciones. Esto evidencia que el rendimiento estuvo influido por la proporción de pulpa y paja en cada formulación. Según los objetivos de este estudio, se concluye que la mezcla 70 % pulpa / 30 % paja presentó el valor más alto de rendimiento biológico del hongo *P. ostreatus*. Esta mezcla mejora la estructura física del sustrato sin afectar la disponibilidad de nutrientes.

Ahora bien, en términos de rendimiento, no solo se considera la rendimiento biológico; también es necesario analizar otros parámetros cuantitativos y temporales para comprender el cultivo. Por ello, relacionado con la producción, se determinó la tasa de producción y la tasa de biodegradación del sustrato. Los resultados de estos indicadores se presentan en el Cuadro 13 y se comparan mediante gráficos axiales. Este tipo de gráfico permite visualizar y comparar simultáneamente las diferentes mezclas dentro de un mismo plano.

Empezando por el rendimiento biológico, ya se identificó que la mezcla 70 % pulpa/30 % paja generó la mayor cantidad de hongos, como se muestra en la Figura 17. Sin embargo, más allá del valor promedio, es relevante analizar la consistencia de los datos. Según el cuadro, Cuadro 58, esta mezcla logró el valor más alto de rendimiento biológico y también tuvo el coeficiente de variación más bajo siendo de $0.80 \pm 0.3\%$, lo que indica

baja variabilidad entre repeticiones y una reproducibilidad consistente bajo las mismas condiciones experimentales. Le siguieron las mezclas 50/50 y 100 % paja, que presentaron un coeficiente de variación de $1.06 \pm 0.2\%$ y $1.49 \pm 0.2\%$, respectivamente lo que refleja una variabilidad intermedia. Este comportamiento se asoció con el contenido reducido de nutrientes reportado para la paja en la caracterización fisicoquímica. Por su parte la mezcla 100 % pulpa, aunque tuvo un promedio de EB alto, mostró el coeficiente de variación más alto $2.30 \pm 0.3\%$, lo que evidenció una mayor dispersión entre las repeticiones y un comportamiento experimental menos consistente.

Siguiendo con la tasa de producción, este parámetro expresa el porcentaje del rendimiento biológico total que se alcanza por día a lo largo del ciclo productivo. Este parámetro describe la eficiencia durante el ciclo, es decir, que porcentaje avanza cada día hacia su producción final. Un valor alto indica que el sustrato permite obtener mayor cantidad de hongos en menos tiempo. Como se observa en la Figura 18, la tasa de producción presentó el mismo comportamiento que la rendimiento biológico, destacando la mezcla 70% pulpa/30% paja con el valor más alto de $2.6 \pm 0.053 \left(\frac{\%}{\text{día}}\right)$, seguida por la combinación de 100% pulpa $1.8 \pm 0.066 \left(\frac{\%}{\text{día}}\right)$. Sin embargo, en este aspecto, los valores de ambas mezclas no fueron muy similares, y esta diferencia indica variaciones en su rendimiento; aunque la pulpa sola logró un rendimiento total alto, la velocidad de producción fue más baja. Esto podría explicarse porque el hongo utiliza primero los azúcares simples presentes en la pulpa, pero al agotarse estos compuestos fácilmente degradables, el proceso se ralentiza al enfrentarse a la degradación de componentes más complejos, que si bien no forman parte directa de la nutrición del hongo, están presentes en el sustrato.

Tal y como señalan Sánchez y Royse (2002), la pulpa de café contiene compuestos como cafeína y taninos que pueden generar metabolitos tóxicos. No obstante, se espera que una porción significativa de la cafeína se transfiera principalmente al grano, mientras que la concentración residual en la pulpa depende del tipo de despulpado utilizado. En esta investigación se usó pulpa de un proceso de despulpado por vía húmeda. Según Arya et al. (2021), este método ayuda a eliminar parcialmente ciertos compuestos durante el lavado, lo que reduce su cantidad en el sustrato. En contraste, en el despulpado por vía seca, donde dichos compuestos permanecen en mayor proporción y se concentran en el residuo. Esto es relevante porque *Pleurotus ostreatus* es consumido como alimento y aporta carbohidratos, proteínas, vitaminas y aminoácidos esenciales, por lo que debe cumplir con parámetros de inocuidad para su consumo.

En la investigación de Tsigkou et al. (2024), tras el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en pulpa de café, se observó que los compuestos fenólicos y la cafeína permanecen en gran medida en el sustrato residual. Aunque el hongo no es capaz de degradar completamente la cafeína, la concentración transferida a los cuerpos fructíferos fue muy baja ($< 10,0 \mu\text{g/g}$ en base seca), la concentración no superó los niveles reportados como problemáticos en la literatura. Además, la composición de macronutrientes y micronutrientes de las setas obtenidas no difiere de la reportada normalmente para esta especie, lo que coincide con las composiciones nutricionales previamente reportadas para esta especie. Por lo tanto, la disminución observada en la tasa de producción no puede atribuirse directamente a la

presencia de cafeína u otros compuestos fenólicos, sino más bien a las características estructurales del sustrato. Esto se corroboró mediante la prueba de Tukey ver Cuadro 62, en la cual las mezclas 70 % pulpa/30 % paja y 100 % pulpa mostraron diferencias significativas en la tasa de producción, mientras que el comportamiento del 100 % pulpa fue estadísticamente similar al de combinaciones con mayor contenido de paja. Esto indica que, las propiedades físicas del sustrato como la compactación de la pulpa y la aireación limitada redujeron la velocidad de producción. Este comportamiento se observa en la densidad aparente medida al momento de la inoculación (Cuadro 47), donde valores más bajos de densidad indican mayor presencia de espacios de aire dentro del sustrato.

Ahora bien, la tasa de biodegradación, así denominada en el cultivo de hongos comestibles, se determina en base húmeda, ya que refleja el proceso tal como ocurre durante el cultivo (Zárate, 2015). Este parámetro representa el porcentaje del sustrato que es degradado por el hongo a lo largo del ciclo productivo, a partir de la relación entre la masa húmeda inicial y la masa húmeda final del sustrato indicando del grado de descomposición alcanzado en cada mezcla. La humedad correspondiente a cada tratamiento se reporta en el Cuadro 42, ya que este factor influye directamente en la interpretación de la biodegradación. Una mayor tasa de biodegradación se asocia con una mayor actividad enzimática y un mayor grado de descomposición del sustrato. Inicialmente, se esperaba que la tasa de biodegradación siguiera la misma tendencia observada en los parámetros productivos y temporales; sin embargo, se identificó una variación relevante. En la Figura 19, se observa que la mezcla 70 % pulpa / 30 % paja presentó la mayor tasa de biodegradación, seguida de las mezclas 50 % pulpa / 50 % paja, 100 % paja y, finalmente, 100 % pulpa. Esta diferencia muestra que las mezclas de ambos sustratos degradaron más que los sustratos puros. Los sustratos puros tuvieron valores más bajos: $36.15 \pm 0.028\%$ para el 100% de paja y $33.60 \pm 0.019\%$, para el 100% de pulpa, que es el valor más bajo. Este comportamiento no sigue el mismo patrón de los indicadores anteriores, en los cuales esta mezcla mostró valores altos de rendimiento

Además, a partir de la Figura 46, se observan los diferentes sustratos una vez agotados, lo cual permitió comparar visualmente el grado de compactación entre las formulaciones. En la mezcla con 100% paja, la descomposición es más lenta porque todavía hay fibra sin descomponer. En cambio, en la mezcla de 100% pulpa, aunque parece tener un volumen más reducido, eso no significa que se descomponga más rápido. Por el contrario, la masa residual húmeda fue mayor; esto se debe a que la mayor parte de la degradación ocurre al inicio, cuando el hongo tuvo acceso a los compuestos más solubles y fácilmente asimilables, y posteriormente el hongo ya no logró seguir descomponiendo el sustrato, principalmente que se observó compactación del sustrato durante la formación de primordios y cuerpos fructíferos jóvenes a partir de la segunda oleada productiva (Figura 40), lo cual limitó la aireación interna y redujo la disponibilidad de oxígeno, el cual es necesario para la actividad metabólica. Por eso, Nkwonta (2013) sugiere la mezcla de dos sustratos con diferentes residuos agrícolas, para ayuda a mejorar la estructura física y la disponibilidad de nutrientes, evitando así un crecimiento lento y asegurando que los cuerpos fructíferos sean grandes.

En el caso de las mezclas 50 % pulpa / 50 % paja y 70 % pulpa / 30 % paja, la biodegradación del sustrato fue más uniforme y progresiva, siendo esta de $50.51 \pm 0.025\%$

para la mezcla 50/50 y la más alta fue de $56.50 \pm 0.028 \%$ para la de 70/30. Esto ocurre porque el hongo puede aprovechar simultáneamente los nutrientes de ambos sustratos, provocando una degradación más completa. Aunque ambas mezclas mostraron un mejor aprovechamiento del sustrato en comparación con los sustratos puros, no fueron estadísticamente similares entre sí. Según la prueba de Tukey (Cuadro 64), la diferencia entre ambas fue significativa, lo que indica que la mezcla 70/30 no solo tuvo el valor más alto, sino que su comportamiento fue distinto al de la mezcla 50/50; esto se debe a la proporción de paja, ya que una mayor cantidad aporta más fibra resistente a la degradación. Como resultado, aun después del cultivo, el sustrato conserva un volumen considerable. Sin embargo, una mayor biodegradación no necesariamente implica un incremento en el rendimiento biológico.

Aunque la mezcla 50/50 mostró una degradación alta, su rendimiento biológico fue más baja. Esto sugiere que una mayor parte del sustrato degradado se usó para procesos metabólicos en lugar de formar cuerpos fructíferos. Esto se explica porque contaba con los nutrientes aportados por la pulpa, pero al mismo tiempo tenía que degradar la paja, que requiere mayor actividad enzimática. Esto se puede ver en el balance de masa, Figura 16, donde esta mezcla mostró la mayor liberación de CO_2 , lo que indica una alta actividad metabólica. Esto implica que los nutrientes descompuestos no se transformaron en biomasa fúngica, sino que reducen el aprovechamiento del sustrato. Esto coincide con lo señalado por Carrasco et al. (2018), quienes al estudiar la suplementación en cultivos de hongos, encontraron que en algunos sustratos fibrosos, aun cuando se suplementan, persiste un desequilibrio en la composición nutricional que favorece la respiración metabólica, pero no se traduce en una conversión eficiente de la energía hacia la formación de cuerpos fructíferos. Esto es relevante porque se busca aprovechar el residuo, obteniendo un rendimiento productivo cuantificable y al mismo tiempo reducir su volumen para facilitar su manejo posterior. En este sentido, el modelo propuesto contribuye directamente a la bioeconomía circular, ya que, mientras cuando la conversión de residuos en biomasa comestible aumenta, se reduce proporcionalmente la cantidad de desecho generado y se incrementa el aprovechamiento del residuo.

Cabe destacar que la tasa de biodegradación calculada en base húmeda está influenciada por el contenido de agua del sustrato, el cual tiende a incrementarse al combinar materiales con distinta capacidad de retención hídrica. En particular, la pulpa de café tiende a retener mayor humedad que la paja, tanto por su tamaño de partícula más fino como por su tendencia a compactarse, lo que favorece la acumulación de agua en el material residual. Por esta razón, al combinar ambos sustratos, la masa húmeda final no refleja únicamente la fracción degradada, sino también el agua retenida al término del ciclo. Por esta razón, al evaluar la biodegradación en base seca, se puede interpretar con mayor claridad la pérdida real de materia orgánica, como se puede observar en el Cuadro 56, este parámetro siguió la misma tendencia observada en los demás indicadores productivos donde la mezcla 70 % pulpa / 30 % paja presentó el valor más alto, seguida por 100 % pulpa, 50 % pulpa / 50 % paja y, finalmente, 100 % paja. En consecuencia, la biodegradación en base seca refleja de forma más precisa la degradación real de la materia orgánica del sustrato, especialmente en mezclas con distinta capacidad de retención de humedad. Sin embargo, la biodegradación en base húmeda se utiliza desde una perspectiva operativa, ya que refleja el estado real del sustrato al finalizar el cultivo. Un residuo con alto contenido de agua

implica una mayor masa y volumen para su manejo; por ello, si se plantea su almacenamiento o aprovechamiento posterior, es necesario considerar etapas de deshidratación, las cuales representan un consumo adicional de energía.

El hecho de que la mezcla 70 % pulpa / 30 % paja presentara la mayor tasa de biodegradación tanto en base húmeda como en base seca indica que su comportamiento no estuvo condicionado únicamente por la retención de humedad, sino por una degradación de la materia orgánica del sustrato. En términos prácticos, esto refleja una mayor actividad enzimática y un aprovechamiento más eficiente del carbono disponible, favorecido por la combinación de compuestos fácilmente asimilables provenientes de la pulpa y una estructura física aportada por la paja que permitió sostener el proceso de degradación a lo largo del ciclo.

Aunque los parámetros cuantitativos vistos anteriormente permiten identificar rendimiento, en la producción de hongos, que es un proceso biológico, es importante tener en cuenta indicadores temporales que permitan estimar la duración del cultivo y la planificación de las cosechas. Los parámetros en consideración comprenden la duración del ciclo, el número de oleadas productivas y la precocidad. Estos resultados se presentan en el Cuadro 14 y se comparan gráficamente en la Figura 20, mediante un gráfico de barras que muestra el comportamiento de cada mezcla. Inicialmente, el número de oleadas productivas (flushes) corresponde a la cantidad de cosechas sucesivas obtenidas, desde la generación de primordios hasta la recolección de los cuerpos fructíferos en su totalidad. Desde una perspectiva biológica, cada oleada representa un pulso metabólico del micelio, durante el cual se lleva a cabo la movilización de los nutrientes disponibles. Sin embargo, a medida que el ciclo avanza, los recursos del sustrato se reducen progresivamente y el rendimiento por oleada tiende a disminuir. Esto indica que un mayor número de flushes no siempre se asocia con un incremento proporcional en la producción acumulada. Este comportamiento puede observarse en los anexos a partir de la Figura 33, donde se muestra cada oleada productiva para cada mezcla. En este sentido, se debe considerar tanto la cantidad como la frecuencia y duración de las cosechas.

Para *P. ostreatus*, lo esperado es alcanzar entre tres y cuatro oleadas productivas. La mezcla de 100 % pulpa de café fue la que presentó el mayor número de oleadas, alcanzando cuatro. Esto se debe a que el hongo continuó degradando los compuestos complejos presentes en el sustrato durante las fases finales del ciclo, permitiendo una oleada adicional. A pesar de esto, el rendimiento total no fue el más alto, y se evidenció una disminución abrupta en la cantidad de hongos producidos, tal como se observa en el Cuadro 40. Incluso se observó el inicio de una quinta oleada (Nota. Elaboración propia.

Figura 47), pero no se completó, debido a la compactación del sustrato y su agotamiento. Cabe señalar que, sin la aparición de esta cuarta oleada, el rendimiento habría sido similar al determinado en la mezcla de 50 % pulpa/50 % paja, lo que muestra que las composiciones nutricionales interactúa con las características físicas del sustrato en el mantenimiento del ciclo productivo.

En cambio, las demás mezclas alcanzaron únicamente tres oleadas productivas; en las mezclas de 50 % pulpa/50 % paja y 100 % paja, esta oleada inició de forma tardía y, de

manera simultánea, mientras algunos cuerpos fructíferos lograban desarrollarse, otros primordios se secaban y adquirirían una apariencia opaca (Figura 48 y 49), lo que indica un agotamiento progresivo del sustrato durante la tercera oleada. A pesar de que el rendimiento acumulado fue menor en comparación con otras mezclas, se esperaba que pudieran completar las tres oleadas con un comportamiento más uniforme. Sin embargo, la limitada disponibilidad de nutrientes provocó una disminución marcada en la producción final. En cambio, la mezcla de 70 % pulpa/30 % paja no solo completó tres oleadas completas en las que la producción de cuerpos fructíferos se mantuvo estable entre repeticiones. Además, mostró indicios de una cuarta oleada (Figura 46), indicando que los nutrientes se distribuyeron a lo largo del ciclo de forma que sostuvieron la actividad productiva sin un agotamiento inmediato del sustrato.

En cuanto a la duración del ciclo, la mezcla de 70% pulpa y 30% paja tuvo el ciclo más corto, que fue de 54 días, dentro del rango de 45 a 55 días que estableció Stamets (1993) para *P. ostreatus*. El ciclo para la mezcla de pulpa pura fue de 58 días, el cual superó este rango, mientras que las mezclas con mayor contenido de paja presentaron ciclos más prolongados, siendo para la mezcla 50/50, 72 días y para 100% paja, 79 días. Aunque todas las mezclas mostraron colonización completa en el mismo periodo de tiempo de incubación (Figura 31), esto demuestra que la duración total del ciclo dependió de la disponibilidad de nutrientes. En la paja, los altos niveles de hierro afectaron al hongo; según Youri & Tano-Debrah (2005), la presencia de este incide en el metabolismo del hongo, reduciendo la descomposición de la lignina y el funcionamiento de las hifas, las cuales son esenciales para la reproducción del hongo y la absorción de nutrientes. Esto afecta el rendimiento del proceso y prolonga la duración del ciclo productivo. Por otro lado, aunque la mezcla 100 % pulpa presentó un mayor contenido de nutrientes, necesitó un tiempo de cultivo más largo para alcanzar rendimientos comparables con la combinación 70/30, lo cual se relaciona con las características estructurales del sustrato.

Este parámetro se considera de interés, ya que desde la perspectiva de la bioeconomía circular no solo se busca la conversión de residuos en biomasa comestible, sino también lograrlo en el menor tiempo posible, orientando el proceso hacia un uso racional de los recursos y a la reducción de los costos operativos. Al observar el Cuadro 66, el costo preliminar de insumos por kilogramo de hongo producido se estimó en Q62.83 para la mezcla 70 % pulpa/30 % paja, Q. 55.66 en 100 % pulpa, Q. 70.14 en 50/50 y Q. 80.63 en 100 % paja. En paralelo, los precios de mercado muestran que en supermercados locales la bandeja de 340 g de hongo ostra se comercializa entre Q. 42.90 y Q. 45.30, lo que equivale aproximadamente a Q. 126.17 – Q. 133.23 por kilogramo. Esta comparación ofrece una referencia inicial que muestra un margen potencial entre los costos de producción a escala experimental y los precios de comercialización observados en el mercado local. Además, permite vincular el aprovechamiento de un residuo agroindustrial con la posibilidad de reducir su impacto ambiental.

Para terminar con los parámetros de tiempo, la precocidad se refiere al tiempo que pasa entre cada período de producción. Esto está relacionado tanto con la duración total del ciclo como con el número de períodos de producción que se han alcanzado. Se observó que las mezclas con 70% pulpa/30% paja y 100% pulpa de café presentaron los intervalos más cortos, siendo de 15 días, lo que corresponde a un intervalo de recuperación corto y una

frecuencia relativamente alta de producción. Sin embargo, en el caso de la mezcla 100 % pulpa, este valor se mantuvo debido a que alcanzó una oleada productiva adicional en comparación con el resto, compensando así su ciclo más largo. Al final, aunque cumplió con este parámetro, este comportamiento se asoció con un ciclo más largo, lo que retrasó el aprovechamiento del sustrato. En cambio, las mezclas con mayor proporción de paja mostraron tiempos de recuperación más largos, siendo de 21 días en la mezcla 50 % pulpa/50 % paja y 23 días en la de 100 % paja, lo que se asocia con una menor velocidad en la movilización de nutrientes y en la sostenibilidad de la producción. Estos resultados reflejan que la precocidad influye directamente en la frecuencia de cosechas y en la eficiencia operativa del cultivo

Este valor no afecta directamente el rendimiento biológico, pero sí influye en la tasa de producción. En este sentido, el tiempo de recuperación y producción del hongo se relaciona con la frecuencia de las cosechas, lo que se refleja en el grado de aprovechamiento del sustrato. En la Figura 29, se presentan los sustratos después de su esterilización. Se identifica que la paja tiene forma alargada y heterogénea. De acuerdo con Albertó (2008), aunque las pajas de cereales o caña permiten una mayor aireación interna del sustrato, cuando las partículas son excesivamente grandes, disminuyen la densidad de empaquetamiento y mejoran la transferencia de agua hacia el micelio. Por otro lado, la pulpa de café presenta un tamaño de partícula más homogéneo. Esto es resultado del proceso de despulpado, en el cual la mayoría se parten a la mitad lo que facilita una colonización inicial más uniforme. No obstante, sus fragmentos encajan entre sí, provocando que estos se compacten con facilidad. Esta compactación reduce el espacio poroso disponible y limita el intercambio gaseoso, lo que dificulta la formación de nuevos primordios, incluso cuando el micelio permanece activo dentro del sustrato. En este contexto, el acondicionamiento de mezclas permite mejorar su estructura, porosidad, capacidad de retención de humedad y disponibilidad de nutrientes. Estas propiedades inciden directamente en los procesos de transferencia de oxígeno y de masa, las cuales influyen en suministro de nutrientes y humedad hacia el micelio.

Cabe mencionar que, una vez finalizado el ciclo productivo, el sustrato residual presenta una apariencia y comportamiento físico distintos a los del material inicial. Durante el cultivo, el micelio de *Pleurotus ostreatus* desarrolla una red estructural de hifas que se integra con el sustrato, modificando su estructura. Tal como se observa en la Figura 52, el sustrato residual fue sometido a un proceso preliminar de secado y posterior prensado. Bajo estas condiciones, el material mostró una compactación uniforme sin fracturarse, tendiendo a comportarse como un bloque sólido continuo. Este comportamiento se atribuye a la red micelial que actúa como un aglutinante natural, promoviendo la cohesión entre las partículas del sustrato y favoreciendo la reducción de su volumen.

El aprovechamiento del sustrato residual del cultivo de hongos ha sido objeto de múltiples investigaciones a nivel internacional. Diversos estudios han explorado su uso en aplicaciones agrícolas como en suplemento para alimentación animal y se han propuesto aplicaciones biotecnológicas orientadas a la obtención de componentes estructurales del micelio, tales como quitina, quitosano y β -glucanos, los cuales permanecen asociados a la red micelial tras el cultivo. En países con sistemas de producción de hongos más industrializados, como Brasil, China y Malasia, el sustrato residual se utiliza también como

biomasa para la generación de energía, mediante procesos de peletización y su posterior uso en combustión o gasificación. Este enfoque permite integrar la producción de hongos con sistemas de aprovechamiento energético, reduciendo la generación de residuos y contribuyendo a la autosuficiencia energética de las plantas productivas. Adicionalmente, se han investigado aplicaciones del sustrato residual como material de embalaje, en sustitución de polímeros sintéticos como el poliestireno expandido, aprovechando la capacidad aglutinante del micelio. De esta manera, el cultivo de *Pleurotus ostreatus* no solo contribuye a la producción de biomasa comestible, sino que también se integra dentro de un enfoque de economía circular, en el cual el residuo generado puede ser valorizado y reincorporado en nuevos procesos productivos.

Ahora bien, el cultivo de hongos es un proceso biotecnológico ampliamente explorado en diversos países. En el caso de México y Brazil, se han desarrollado modelos productivos que incorporan la pulpa de café como parte de las formulaciones de sustrato y se han cultivado en especies comestibles como *Pleurotus*, *Lentinula* y *Auricularia* (Martínez-Carrera et al., 1985). Para su aprovechamiento a mayor escala, se han explorado sistemas de manejo de grandes volúmenes y el almacenamiento en silos. Por otro lado, en pruebas a escala piloto, Elewi et al. (2024) se enfocaron en el control de parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa y ventilación, con el fin de mantener condiciones estables y reducir el riesgo de contaminación. De igual forma, en El Salvador, Calderón López y Bhaktikul (2018) llevaron a cabo un estudio sobre el cultivo de *P. ostreatus* en residuos y pulpa de café, en el que se reportaron resultados relacionados con aspectos técnicos, económicos y ambientales. Esto confirma que el aprovechamiento de la pulpa de café como sustrato para el cultivo de hongos comestibles ha sido explorado en otros países, dentro de esquemas de producción sostenibles y escalables. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación aportan información específica para Guatemala, al analizar su comportamiento de este material en mezclas con paja de trijo.

Es por ello que, que al comparar parámetros productivos y temporales se determinó que, la mezcla con 70 % pulpa y 30 % paja presentó el mayor rendimiento biológico y el menor tiempo de cultivo, al integrar las composiciones nutricionales de la pulpa con la mejora estructural proporcionada por la paja. La densidad aparente reportada en el Cuadro 47 fue menor en comparación con la pulpa sola, lo que redujo la compactación del sustrato y favoreció condiciones físicas adecuadas a lo largo del ciclo productivo. Asimismo, como se puede observar en el Cuadro 68 se estimó composición de la mezcla a partir de los valores promedio obtenidos en la caracterización fisicoquímica individual de cada sustrato, considerando sus proporciones en base seca, demostrando un contenido de nitrógeno de 1.503 % y una relación C/N de 33.7, valores que se ubican dentro del rango recomendado para el crecimiento de *Pleurotus ostreatus*. El pH de la mezcla sería de 7.29, superior al de la pulpa de café, pero aún mantiene la actividad metabólica del hongo. En cuanto a los micronutrientes, la reducción en las concentraciones de hierro y manganeso respecto a la paja disminuyó el riesgo de acumulación excesiva de estos elementos en la biomasa fúngica. Estos resultados evidencian que la pulpa de café puede utilizarse en el cultivo de hongos comestibles, al constituir el componente mayoritario de esta mezcla y plantearse como una alternativa para la gestión sostenible de este residuo agroindustrial.

IX. Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la región Occidental de Guatemala mostró una relación C/N de 28.15, un pH de 6.78 y un contenido de nitrógeno de 1.80 % (m/m). Por otro lado, la paja presentó una relación C/N de 61.33, un pH de 8.47 y un contenido de nitrógeno de 0.81 % (m/m). Estos valores muestran las diferencias en la composición de ambos materiales, considerando que *Pleurotus ostreatus* requiere una relación C/N entre 20:1 y 30:1 y en pH ligeramente ácido a neutro. De esta forma, si bien ambos materiales presentan capacidad para emplearse como sustratos, es necesario considerar que su composición influye directamente en el rendimiento del cultivo.
- Se obtuvo un rendimiento biológico de 1.21 ± 0.066 para 100 % pulpa de café, 0.96 ± 0.051 para 100 % paja, 1.36 ± 0.053 para 70 % pulpa/30 % paja y 1.01 ± 0.073 para 50 % pulpa/50 % paja. El análisis de varianza y la prueba de Tukey confirmaron que la mezcla 70 % pulpa/30 % paja presentó el valor significativo más alto de rendimiento biológico, además de registrar el coeficiente de variación más bajo (0.80 ± 0.3 %), lo que indica que esta mezcla presentó menor dispersión entre repeticiones bajo las mismas condiciones experimentales.
- En las cuatro mezclas de sustrato se determinaron como parámetros el rendimiento biológico, la tasa de producción, la tasa de biodegradación, y la precocidad. Al compararlas, la prueba de Tukey mostró que la mezcla 70 % pulpa/30 % paja presentó diferencias significativas en todos los parámetros frente a las demás combinaciones, con un rendimiento biológico de 1.36 ± 0.053 , una tasa de producción de $2.61 \pm 0.053 \left(\frac{\%}{\text{día}} \right)$, una tasa de biodegradación de $56.50 \pm 0.026\%$ y una precocidad de 15 días. Estos resultados muestran que la pulpa de café, en esta proporción de mezcla, presentó los valores más altos en los parámetros productivos analizados dentro del cultivo de *Pleurotus ostreatus*.

X. Recomendaciones

- Cuantificar celulosa y lignina en la pulpa de café y la paja, con el fin de evaluar su influencia en la degradación del sustrato, la actividad enzimática del micelio y los parámetros productivos del cultivo.
- Realizar la caracterización fisicoquímica de pulpas de café (*Coffea arabica*) provenientes de distintas fincas dentro de una misma región y de otras regiones productoras de Guatemala, con el fin de comparar su composición y determinar cómo estas diferencias podrían influir en su uso como sustrato en el cultivo de hongos.
- Realizar el cultivo bajo las mismas condiciones utilizando otras especies de hongos comestibles, para poder comparar el rendimiento y evaluar si el proceso es reproducible.
- Evaluar el uso de la pulpa de café en combinación con otros residuos agroindustriales como sustrato para el cultivo de hongos comestibles, con el fin de analizar la composición y la estructura del sustrato.
- A partir de la identificación de la mezcla 70% pulpa de café / 30% paja como la combinación más eficiente, se sugiere desarrollar el modelo cinético de crecimiento de con el fin de proponer su escalamiento industrial.
- Proponer el diseño de una planta para la producción de hongos a partir de la pulpa de café, considerando el diagrama de proceso, las operaciones unitarias, la selección de equipos necesarios para su implementación y su viabilidad económica.
- Realizar un análisis nutricional, sensorial y de vida de anaquel de los hongos producidos con el objetivo de evaluar su potencial comercial y compararlo con productos disponibles en el mercado.
- Evaluar el control genético del micelio de *Pleurotus ostreatus* como variable del proceso, mediante el seguimiento de su comportamiento productivo y cinético a lo largo de ciclos productivos, con el fin de reducir la variabilidad biológica del cultivo.
- Valorar el sustrato residual poscosecha mediante su caracterización fisicoquímica, con el fin de identificar y evaluar posibles aplicaciones posteriores.

XI. Referencias

- Acevedo, R. (2017). Valoración y crecimiento del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en cuatro sustratos generados a partir de procesos productivos agropecuarios, en el municipio de Málaga Santander. , 4, 1. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 4(1), 15-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/24220582.857>
- adidas. (2025.). <https://www.adidas.es/go/campaign/impact/planet>
- Agexport Guatemala – Directorio de Exportadores. (2024). *Directorio de exportadores*. <https://directorio.export.com.gt/>
- Agrícola Grotto. (2022). *Agrícola Grotto*. <http://agricolagrotto.com/>
- Aguilar-Barojas, S. (2005). *Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>
- Alananbeh, K. M., Bouqellah, N. A., & Kaff, N. S. A. (2014). Cultivation of oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* on date-palm leaves mixed with other agro-wastes in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(6), 616–625. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.08.001>
- Albertó, E. (2008). *Cultivo intensivo de los hongos comestibles: Cómo cultivar champiñones, gírgolas, shiitake y otras especies* (1ª ed.). Hemisferio Sur S.A.
- Alonso, J., García, M., Pérez, J., & Melgar, M. (2004). Acumulación de metales pesados en macromicetos comestibles y factores que influyen en su captación. *Revista de Toxicología*, 21(1), 11-15. <https://www.redalyc.org/pdf/919/91921102.pdf>
- ArcGIS Dashboards. (2024). *Inicio*. <https://doc.arcgis.com/es/dashboards/>
- Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2021). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5>
- Asociación Nacional del Café [Anacafé]. (2021). *Guía de variedades de café y selección de semilla* (4ª ed., 71 págs.)Anacafe.org. <https://www.anacafe.org/manuales/guia-de-variedades-de-cafe-guatemala/>
- Asociación Nacional del Café [Anacafé]. (2021). *La importancia del café en la economía de Guatemala: productividad, sostenibilidad, migración y huella*. <https://www.anacafe.org/uploads/file/755c7c3b498c4b3e8a4acfc94b2dd3ad/Estudio-Cabi-2022.pdf>
- Asociación Nacional del Café [Anacafé]. (2024). *Café de Guatemala: resultados de la cosecha 2023-2024*. <https://www.anacafe.org/cierre-cosecha-2023-2024/>

- Asociación Nacional del Café [Anacafé]. (2025). *Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de Anacafé (Analab)*. <https://www.anacafe.org/analab/>
- Banco de Guatemala. (2023). *Planilla de activos de reserva y liquidez en moneda extranjera*. <https://banguat.gob.gt/page/octubre-2023>
- Banco de Guatemala. (2025). *GUATEMALA: VALOR (FOB), VOLUMEN Y PRECIO MEDIO DE LOS 25 PRINCIPALES PRODUCTOS DE EXPORTACIÓN*. <https://banguat.gob.gt/page/cuadro-1-1>
- Baptista, F., Almeida, M., Paié-Ribeiro, J., Barros, A., & Rodrigues, M. (2023). Unlocking the potential of spent mushroom substrate (SMS) for enhanced agricultural sustainability: from environmental benefits to poultry nutrition. *Life*, *13*(10), 1-2. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/life13101948>
- Barba, J., & López, J. (2017). *Guía práctica para el cultivo de setas*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Bellettini, M., Fiorda, F., Maieves, H., Teixeira, G., Ávila, S., Hornung, P. J., & Ribani, R. (2016). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *26*(4), 633-646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Berger, J. (2003). *Estrategias de negocios basados en la productividad y calidad total del sector caficultor guatemalteco [Tesis de licenciatura]*. Universidad del Istmo.
- Bermúdez, R., García, N., Aguilera, I., & Mendoza, Y. (2023). Biodegradación de residuos agroindustriales lignocelulósicos por *Pleurotus* spp. *Tecnología Química*, *43* (1), 157-173. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5317>
- Bermúdez, R., García, N., & Murlot, A. (2007). Fermentación sólida para la producción de *Pleurotus* sp. sobre mezclas de pulpa de café y viruta de cedro. *Tecnología Química*, *27*(2), 55-62. <https://www.redalyc.org/comocitar.ou?id=445543753009>
- Boa, E. (2004). *Wild edible fungi: A global overview of their use and importance to people* (Non-Wood Forest Products, 17). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bobková, A., Poláková, K., Demianová, A., Belej, Ľ., Bobko, M., Jurčaga, L., Gálik, B., Novotná, I., Iriondo-DeHond, A., & Del Castillo, M. D. (2022). Comparative Analysis of Selected Chemical Parameters of *Coffea arabica*, from Cascara to Silverskin. *Foods*, *11*(8), 1082. <https://doi.org/10.3390/foods11081082>
- Braham, J., & Bressani, R. (1978). *Pulpa de café: composición, tecnología y utilización*. CIID.
- Bran, M., Morales, O., Cáceres, R., & Flores, R. (2003). Contribución al conocimiento de los hongos comestibles de Guatemala. *Revista Científica*, 5–24. <https://doi.org/10.54495/rev.cientifica.edicionespecial2003.232>

- Bustamante, G. (2011). Aproximación al muestreo estadístico en investigaciones científicas. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 10, 476.
- Cano, A., & Romero, L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(1), 75-80. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/s0717-75182016000100011>
- Carrasco, J., Zied, D. C., Pardo, J. E., Preston, G. M., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>
- Carrasco, J., Zied, D. C., Pardo, J. E., Preston, G. M., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>
- Chang, S., & Miles, G. (2004). *Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effects and environmental impact*. CRC Press.
- Chen, X., Zhou, H., & Qiu, G. (2009). Analysis of Several Heavy Metals in Wild Edible Mushrooms from Regions of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83(2), 280–285. HYPERLINK "<https://doi.org/10.1007/s00128-009-9767-8>" <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9767-8>
- Chen, Y., Chefetz, B., Rosario, R., Van Heemst, J., Romaine, C. P., & Hatcher, P. (2000). Chemical nature and composition of compost during mushroom growth. *Compost Science & Utilization*, 8(4), 347–359. <https://doi.org/10.1080/1065657x.2000.10702008>
- COINPU. (2025). *Hongos ostra*. <https://www.coinpurl.com/>
- Contreras, N., Del Olmo, M., García, R., & Vidal, G. (2022). Pleurotus spp., producción, cultivo y propiedades. En V. García, *Potencialidades de la ovicultura y los hongos comestibles (Pleurotus spp.) en la seguridad alimentaria y el desarrollo rural* (págs. 81-106). Laberinto Ediciones.
- Cruz, D., López, E., Pascual, L., & Battaglia, M. (2010). Guía técnica de producción de hongos comestibles de la especie Pleurotus ostreatus. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 104(3-4), 139-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.12895/jaeid.20103/4.16>
- Dissasa, G. (2022). Cultivation of different oyster mushroom (Pleurotus species) on coffee waste and determination of their relative biological efficiency and pectinase enzyme production, Ethiopia. *International Journal Of Microbiology*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/5219939>
- Effiong, M. E., Umeokwochi, C. P., Afolabi, I. S., & Chinedu, S. N. (2024). Assessing the nutritional quality of Pleurotus ostreatus (oyster mushroom). *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1279208>

- Elyson, S., Jonathan, C., Kudakwashe, C., & Loice, C. (2024). Evaluation of wheatstraw, sawdust, banana fronds, maize cobs and cotton hulls substrate combinations for *Pleurotus ostreatus* cultivation. Research Square (Research Square). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4831136/v1>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. (2025). The State of Food Security and Nutrition in the World 2025 – Addressing high food price inflation for food security and nutrition. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd6008en>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2018). Principios elementales de los procesos químicos (4.^a ed.). México: Limusa Wiley.
- Fierro, N., Contreras, A., González, O., Rosas, E., & Morales, V. (2018). Caracterización química y nutrimental de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.). *Agro Productividad*, 11(4), 9-13. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/download/261/192/435>
- Fungipor. (2025). Fungipor®. <https://fungipor.com/#!/-inicio/>
- Gaitán, R., Salmenes, D., Pérez, R., & Mata, G. (2006). *Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción*. Instituto de Ecología A. C.
- Garcés, A., Vélez, N., Ruiz, S., Serna, J., & Suárez, E. (2005). Evaluación de algunos residuos orgánicos como sustrato para el cultivo de hongos comestibles. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(2), 15-20. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520204.pdf>
- García, M. A., Alonso, J., Fernández, M. I., & Melgar, M. J. (1998). Lead Content in Edible Wild Mushrooms in Northwest Spain as Indicator of Environmental Contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 34(4), 330–335. HYPERLINK "https://doi.org/10.1007/s002449900326" <https://doi.org/10.1007/s002449900326>
- García, N., Bermúdez, R., & Serrano, M. (2011). Formulaciones de sustratos en la producción de setas comestibles *Pleurotus*. *Tecnología Química*, 31(3), 272-282. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852011000300002&script=sci_abstract
- Garuba, T., Abdulkareem, K. A., Ibrahim, I. A., Oyebamiji, O. I., Shoyooye, O. A., & Ajibade, T. D. (2017). Influence of substrates on the nutritional quality of *Pleurotus pulmonarius* and *Pleurotus ostreatus*. *Ceylon Journal of Science*, 46(1), 67. <https://doi.org/10.4038/cjs.v46i1.7419>
- Gatica-Domínguez, G., Victora, C., & Barros, A. J. D. (2019). Ethnic inequalities and trends in stunting prevalence among Guatemalan children: an analysis using national health surveys 1995–2014. *International Journal for Equity in Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12939-019-1016-0>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). The circular economy: a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), 757-768. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). Abordar el cambio climático a través de la ganadería: Una evaluación global de las emisiones y las oportunidades de mitigación. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://doi.org/10.13130/9789251079201>
- Ghimire, A., Pandey, K., Joshi, Y., & Subedi, S. (2021). Major fungal contaminants of mushrooms and their management. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 9(2), 80-93. <https://doi.org/https://doi.org/10.3126/ijasbt.v9i2.37513>
- Gil-Gómez, J. A., Florez-Pardo, L. M., & Leguizamón-Vargas, Y. C. (2024). Valorization of coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. *Deleted Journal*, 6(9). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9>
- González, E., Ortiz, E., Mejía, Y., García, L., & Cifuentes, X. (2020). Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*. *Revista ION*, 33(1), 93-102. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/journal/3420/342065400009/html/>
- Green, D., Southard, M. (2019). Perry's Chemical Engineers' Handbook (9th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Grimm, D., Sonntag, E., & Rahmann, G. (2024). EVALUATION OF DIFFERENT PASTEURIZATION AND STERILIZATION METHODS FOR OYSTER MUSHROOM SUBSTRATES. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*, 13(5), e10428. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.10428>
- Guo, D., Liu, C., Zhu, H., Cheng, Y., Guo, Y., Yao, W., Qian, H., & Jiang, J. (2024). Large edible mushrooms and mycelial proteins: A sustainable, nutritious protein source with health benefits and processing innovations. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 103870. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103870>
- Hernández, F., Reyes, O., DicoovskiRioboó, L., & Pichardo, C. (2012). *Caracterización de tres beneficios húmedos colectivos y uno industrializado de café con énfasis en una propuesta de mejora de un modelo de beneficio húmedo colectivo en la Unión de Cooperativas Agropecuarias del Norte (UCANOR), Jinotega [Trabajo de grado]*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Herrera, A. V., Bolaños-González, M. A., Salvador-Castillo, J. M., & Armas, L. M. R. (2024). Estrategias de manejo de la pulpa de café para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14441.10083>
- Ikehata, K., Buchanan, I. D., & Smith, D. W. (2004). Recent developments in the production of extracellular fungal peroxidases and laccases for waste treatment. *Journal of*

Environmental Engineering and Science, 3(1), 1–19. HYPERLINK
"https://doi.org/10.1139/s03-077" https://doi.org/10.1139/s03-077

- IndexBox, Inc. (2025, octubre 1). *Guatemala: Mushroom and truffle market 2025*.
<https://www.indexbox.io/store/guatemala-mushrooms-and-truffles-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2001). *Manual para la producción de hongos comestibles del género Pleurotus sp.* Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Jiang, L., Xu, B., & Wang, Q. (2025). Functional Characteristics and Cellulose Degradation Genes of the Microbial Community in Soils with Different Initial pH Values. *Agriculture*, 15(10), 1068. <https://doi.org/10.3390/agriculture1510106>
- Joshi, K., Meher, M., & Poluri, K. (2020). Fabrication and characterization of bioblocks from agricultural waste using fungal mycelium for renewable and sustainable applications. *ACS Applied Bio Materials*, 3(4), 1884-1892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsabm.9b01047>
- Juárez, F. (2018). *El café guatemalteco: un enfoque en el mercado mundial y su productividad*. ASIES.
- Juárez, J. I. N., Ruiz, Á. D. C., & López, W. A. R. (2019). ESTUDIO PRELIMINAR DE LA COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DEL HONGO *Pleurotus ostreatus* CULTIVADO EN PULPA DE CAFÉ. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 422-431. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.256>
- Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhrue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., Vadthananat, S., & Lumyong, S. (2020). Cultivation of mushrooms and their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of Agro-Industrial waste. *Molecules*, 25(12), 2811. <https://doi.org/10.3390/molecules25122811>
- La Carreta. (2025). *La Carreta*. https://delivery.lacarreta.com.gt/landing_products/1#products
- Leet, S. K. & K. (2023, December 4). Materiales de micelio: El futuro de cultivar nuestros hogares. ArchDaily En Español. <https://www.archdaily.cl/cl/986651/materiales-de-micelio-el-futuro-de-cultivar-nuestros-hogares>
- Limousy, L., Jeguirim, M., & Labaki, M. (2017). Energy applications of coffee processing by-products. In Elsevier eBooks (pp. 323–367). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811290-8.00011-6>
- Maina, S., Kachrimanidou, V. y Koutinas, A. (2017). Una hoja de ruta hacia una bioeconomía circular y sostenible mediante la valorización de residuos. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 8, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.007>

- Mantilla, J. (2019). *Optimización del proceso conocido como “beneficio húmedo y seco” en la industria de café. Caso: Finca Villa Ilma María [Trabajo de especialización]*. Fundación Universidad de América.
- Martínez Y., P. N., Garzón C., J. E., Henao Escobar, W., & Guarnizo Franco, A. (2008). Evaluación de la producción del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre los residuos derivados de la producción comercial del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Tumbaga*, 1(3), 43-53.
- Martínez-Carrera, D., C. Soto & G. Guzmán, (1985a), Cultivo de *Pleurotus ostreatus* en pulpa de café con paja como substrato. *Rev. Mex. Mic.*, 1, 101-108.
- Martínez, D., Aguilar, A., Martínez, W., Bonilla, M., Morales, P., & Sobal, M. (2000). Commercial production and marketing of edible mushrooms cultivated on coffee pulp in Mexico. En T. Sera, C. Soccol, A. Pandey, & S. Roussos, *Coffee biotechnology and quality* (págs. 471-488). Springer.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2012). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw-Hill.
- Mendoza, H. (2020). *Análisis de la producción del hongo comestible Pleurotus ostreatus obtenida a partir de los subproductos de la etapa de despulpado del café [Tesis de pregrado]*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Mengesha, D., Retta, N., Woldemariam, H. W., & Getachew, P. (2024). Changes in biochemical composition of Ethiopian Coffee arabica with growing region and traditional roasting. *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1390515>
- Micelio Guatemala. (2025). *Micelio Guatemala*. <https://www.micelio.com.gt/>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2024). Ficha técnica: Producción de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*). Gobierno de Guatemala. <https://guatemalanosedetiene.gt/wp-content/uploads/2024/06/FICHA-TECNICA-HONGO-OSTRA.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Guía ambiental para el sector café de Guatemala* (2 ed.). Anacafé.
- Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (MEM). (2025). *Listado de depósitos de almacenamiento para consumo propio*. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/05/Listado-de-Depositos-de-consumo-Propio.pdf>
- Molina, K. (2017). *Una guía de los cafés de Guatemala*. Perfect Daily Grind Español: <https://perfectdailygrind.com/es/2017/10/25/una-guia-de-los-cafes-de-guatemala/>
- Montenegro, I., & Stuardo, C. (2021). *Introducción al cultivo de hongos*. Instituto Forestal de Chile.

- Montes, O., Bustamante, M., & Paredes, C. (2018, 14-16 noviembre). Caracterización agronómica del sustrato poscultivo de *Pleurotus* spp generado en México. *VI Jornadas Red Española de Compostaje*. Valencia, España.
- Morales, O., Bran, M., & Cáceres, R. (2010). Los hongos comestibles de uso tradicional en Guatemala. *Hacia un desarrollo sostenible del sistema de producción-consumo de los hongos comestibles y medicinales en Latinoamérica: Avances y perspectivas en el siglo 21* (pp. 437–464). México: Instituto de Ecología, A.C.
- Nandeha, N. (2024). Substrates for mushroom production. En R. Padamini, S. Rathour, M. Dange, M. Ali, & H. Chavda, *Mushroom: the fascinating fungi* (págs. 77-94). Emerald Publishing House.
- Navarro, Y. (2023). *Compostaje de la pulpa de café*. Anacafé: <https://www.anacafe.org/uploads/file/7b99975ee9d0478db47df904a1282888/Boletin-Compostaje-Marzo-2023.pdf>
- Nkwonta, (2013). Correlation of stipe length, pileus width and stipe girth of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) grown in different farm substrates. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*. 5. 54-60. 10.5897/JABSD2013.0197.
- Oficina Guatemalteca de Acreditación [OGA]. (2024). *Documento OGA-LE-087-18*. OGA.
- Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2017). *Norma ISO/IEC 17025:2017*. ISO.
- Organización Internacional del Café [OIC]. (2024). *Más allá del café: hacia una economía cafetera circular*. <https://ico.org/documents/cy2024-25/ed-2477c-overview-cdr-2022-23.pdf>
- Osorio, V., Pabón, J., Shuler, J., & Fernández, M. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, 73(1), 7-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Patel, H., Gupte, A., & 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.15376/biores.4.1.268-284>
- Pavel, D., Contreras, A., Ortiz, R., & Ruan, F. (2021). *Hongos comestibles del cafetal*. Instituto de Ecología A. C.
- Phan, C., & Sabaratnam, V. (2012). Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(4), 863-873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00253-012-4446-9>

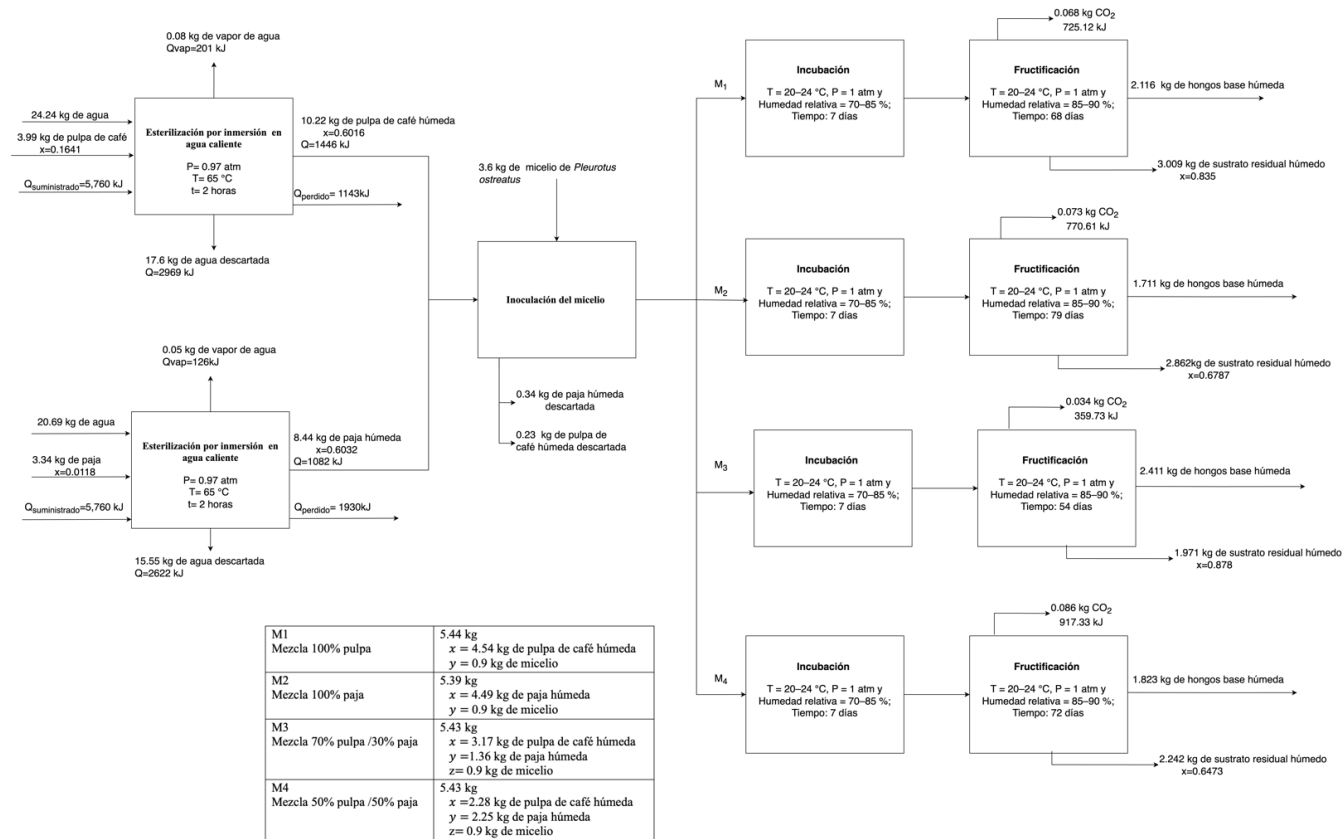
- Pineda, J., Beltrán, L., & Soto, C. (2014). Producción de *Pleurotus ostreatus* por fermentación en estado sólido: una revisión. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 48(2), 13-23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131465002>
- Pineda, J., Duarte, S., & Ponce, A. (2016). *Guía para la producción de champiñón ostra. Bionegocios*. Ibarra.
- Ponce, J. P. M., Calderón, M. a. H., Comandini, O., Rinaldi, A. C., & Arzú, R. F. (2019). Ethnomycological knowledge among Kaqchikel, indigenous Maya people of Guatemalan Highlands. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13002-019-0310-7>
- Ramirez, I. (2025). *Cultivo del hongo ostra, una alternativa saludable - Agencia Guatemalteca de Noticias*. Agencia Guatemalteca de Noticias - AGN. <https://agn.gt/cultivo-del-hongo-ostra-una-alternativa-saludable/>
- Restrepo, L., & Villa, G. (2020). *Estrategias para el aprovechamiento de la pulpa de café en las fincas cafeteras del municipio de Andes, Antioquia [Trabajo de pregrado]*. Tecnológico de Antioquia.
- Risal, S., Wari, E., Alian, M., Zhu, W., & Balan, V. (2023, 21-23 mayo). Modeling urban medium-scale oyster mushroom cultivation using shipping container. *IIE Annual Conference. Proceedings*. Nueva Orleans, Estados Unidos.
- Rodríguez, V., & Jaramillo, L. (2024). *Cultivo de hongos comestibles del género Pleurotus sobre residuos agrícolas de la zona cafetera*. Cenicafé.
- Sales-Campos, C., De Oliveira, L. A., Araujo, L. M., De Jesus Coutinho Varejão, M., & De Andrade, M. C. N. (2009). Composição mineral de uma linhagem de *Pleurotus ostreatus* cultivada em resíduos madeireiros e agroindustriais da região amazônica. *Food Science and Technology*, 29(4), 868–872. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000400026>.
- Salmones, D., Mata, G., & Waliszewski, K. (2004). Comparative culturing of spp. on coffee pulp and wheat straw: biomass production and substrate biodegradation. *Bioresource Technology*, 96(5), 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.019>
- Sánchez, J. E., & Royse, D. J. (2002). *La biología y el cultivo de Pleurotus spp.* https://www.researchgate.net/publication/256526787_Book_La_biologia_y_el_cultivo_de_Pleurotus_spp
- Saucedo, A. (2023). *Historia de la micología*. Revista de la Universidad de México: <https://www.revistadelauniversidad.mx/articles/ae4c44bd-c68b-4b9e-b65b-1d88f25bb4fe/historia-de-la-micologia>
- Sayner, A. (2021). *How to grow mushrooms in buckets (complete guide)*. GroCycle.

- Schroeder, P., Kartika, A., & Weber, U. (2018). The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Shrestha, S., Bhattarai, S., Shrestha, R. K., & Shrestha, J. (2021). *Effect of different substrate sterilization methods on performance of oyster mushroom (Pleurotus ostreatus)*. <https://dspace.emu.ee/items/66dbb6bc-f2e8-4bdd-9318-80afc0137216>
- Skoog, D., West, D., Holler, F., & Crouch, S. (2015). *Fundamentos de la química analítica*. Cengage Learning.
- Sözbir, GD, Bektaş, İ., y Zulkadir, A. (2015). Residuos lignocelulósicos utilizados para el cultivo de hongos *Pleurotus ostreatus*: Efectos en la productividad. *BioResources*, 10(3). <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4686-4693>
- Stamets, P. (1993). *Growing gourmet and medicinal mushrooms*. Ten Speed Press.
- Torre, L. (2025). Hongos-y-champinones - La Torre. <https://www.latorre.com.gt/frutas-verduras-y-complementos/verduras-y-complementos/hongos-y-champinones?srsId=AfmBOokm4KbvCgpxh141jswNObhpsZNTaFgoqOv9U2tEmWeB1y-TvJr>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2024). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- UNICEF. (2024). “En Guatemala el 46,5% de los niños sufre desnutrición crónica.” UNICEF España. <https://www.unicef.es/noticia/en-guatemala-los-ninos-sufre-desnutricion-cronica-maria-claudia-santizo-oficial>
- United Nations Industrial Development Organization [UNIDO]. (2024). *Launch of global platform for coffee industry players to transform 40 million tons of biowaste into business*. <https://www.unido.org/news/launch-global-platform-coffee-industry-players-transform-40-million-tons-biowaste-business>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2025). *Coffee: World Markets and Trade*. Usda.gov. <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0711100>
- Youri, M. R. D., & Tano-Debrah, K. (2005). Mineral Uptake by First Flush Mushrooms (*Pleurotus* spp.) Cultivated on Various Agro-Processing Waste. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 484. <https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.v7.i3.1120>
- Zárate, J. (2015). *Producción y desarrollo de cuatro aislamientos de Pleurotus ostreatus, cultivados en restos de cosecha [Tesis de pregrado]*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

XII. Anexos

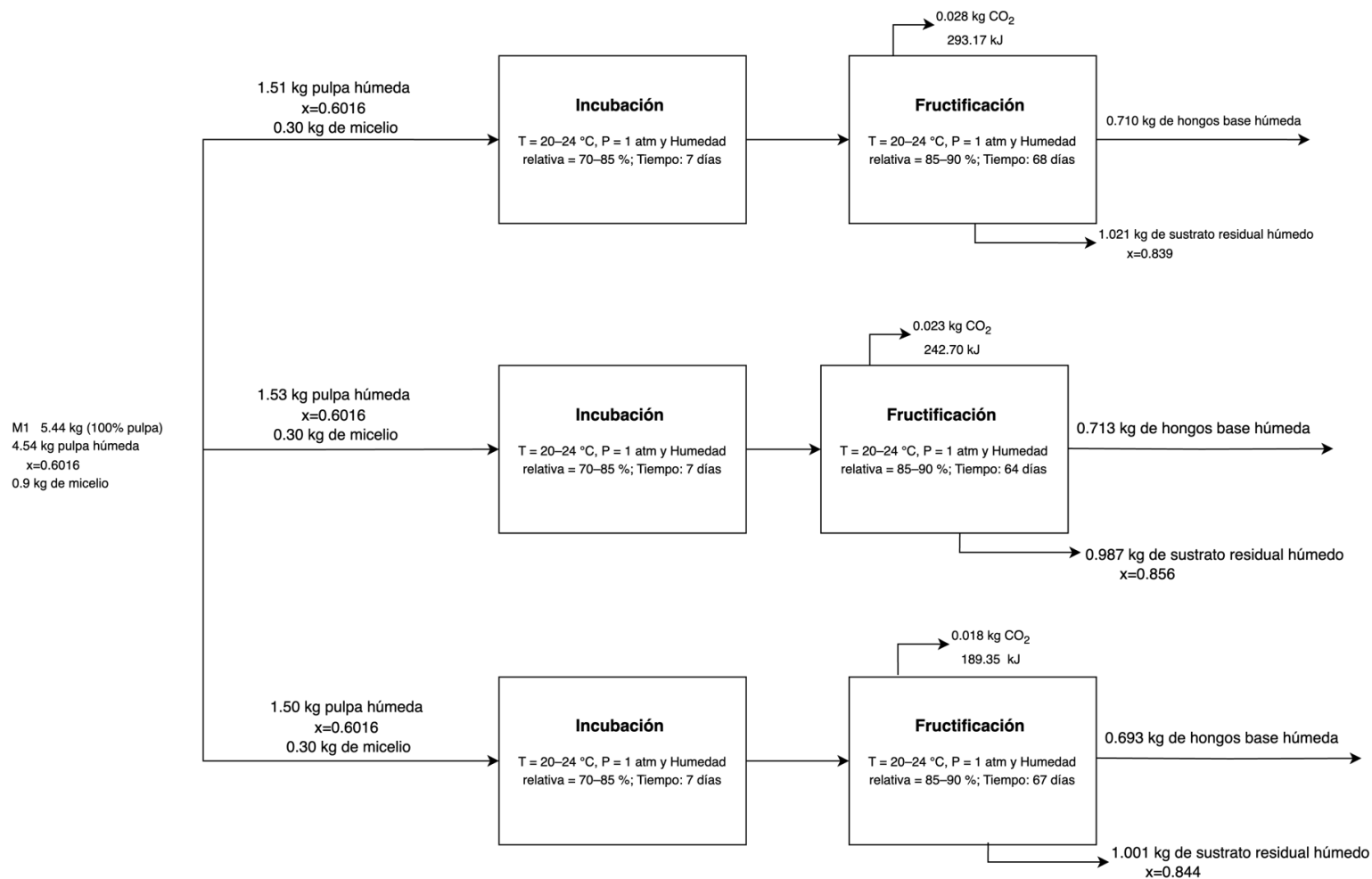
a) Balances de masa y energía

Figura 21. Balance de masa y energía general del proceso del cultivo de *P. ostreatus*



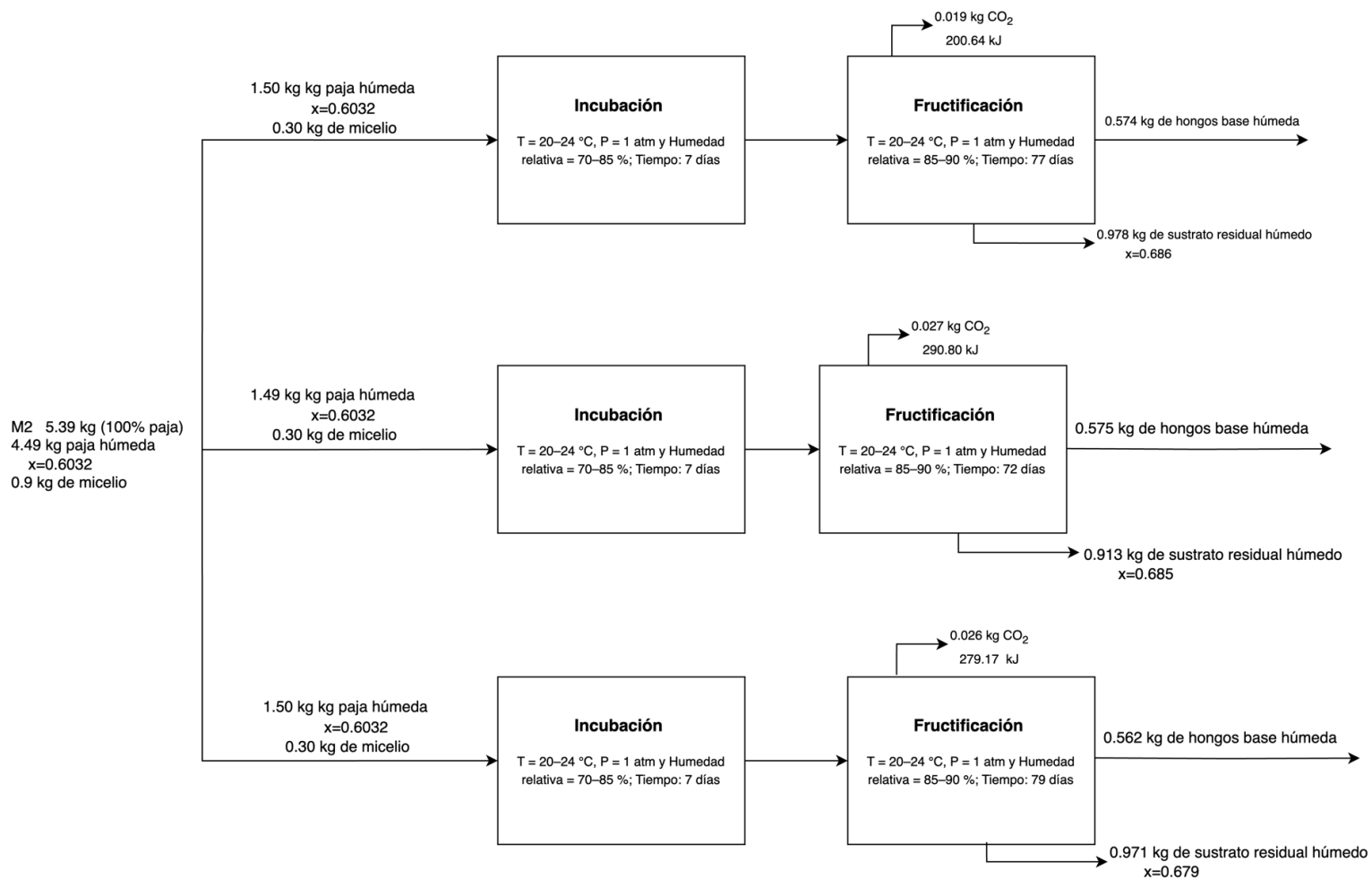
Nota. Elaboración propia.

Figura 22. Balance de masa experimental para la mezcla 100% pulpa de café



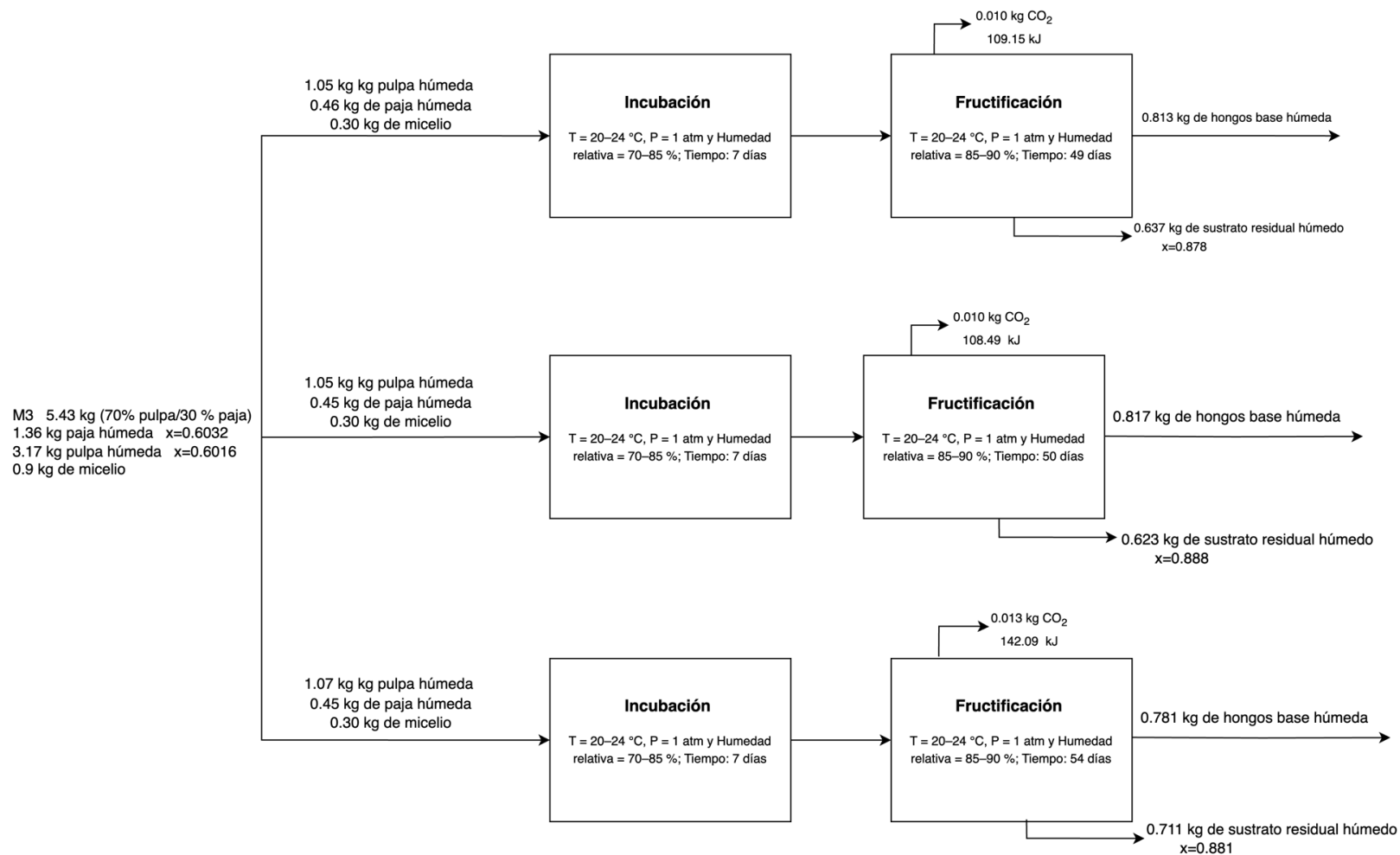
Nota. Elaboración propia.

Figura 23. Balance de masa experimental para la mezcla 100% paja



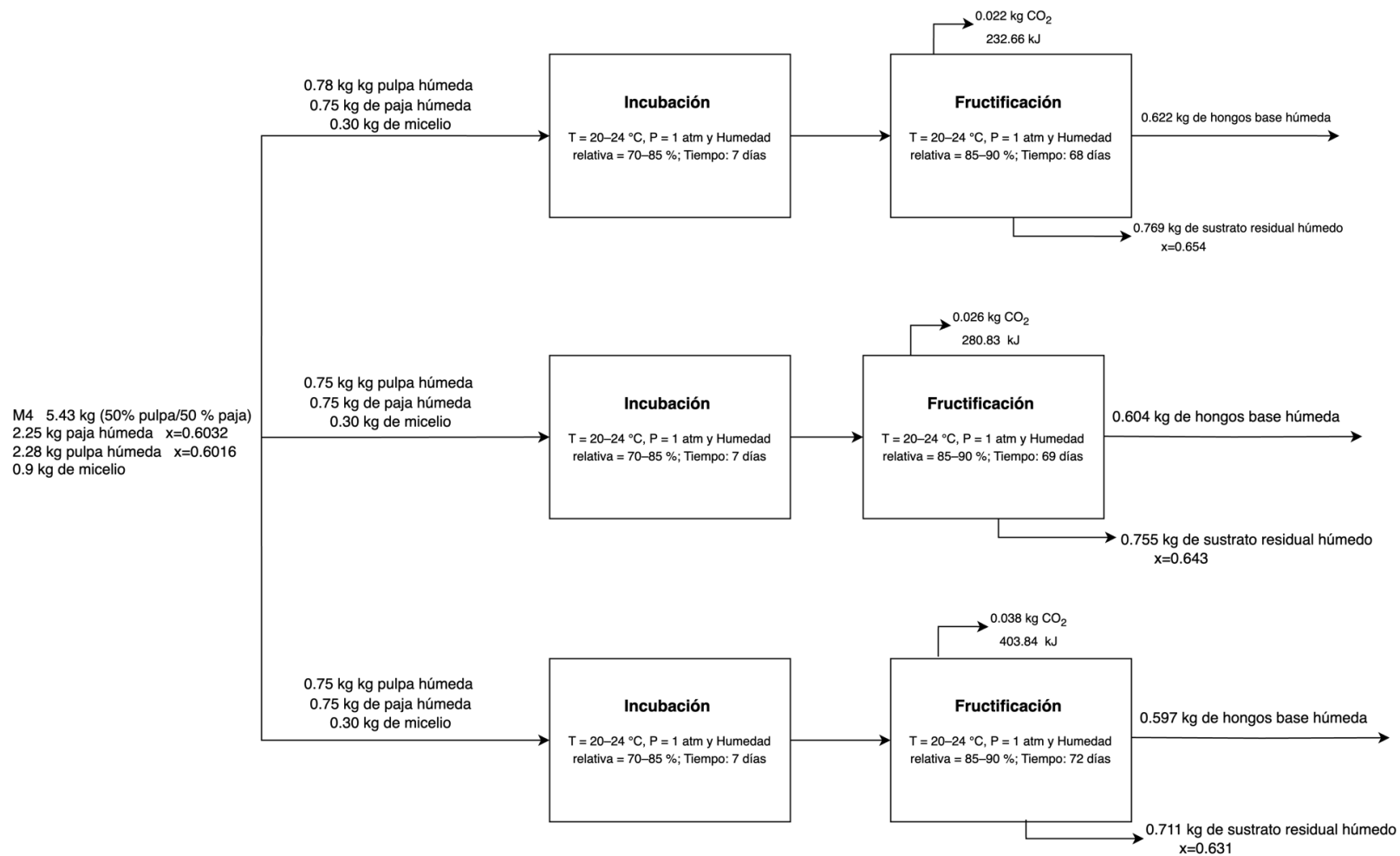
Nota. Elaboración propia.

Figura 24. Balance de masa experimental para la mezcla 70% pulpa de café / 30% paja



Nota. Elaboración propia.

Figura 25. Balance de masa experimental para la mezcla 50% pulpa de café / 50% paja



Nota. Elaboración propia.

b) Datos de placa

Cuadro 15. Datos de la placa de la pesa eléctrica

| | |
|---------------|----------------|
| Marca | OHAUS |
| Modelo | Defender™ 3000 |
| Capacidad | 150 kg |
| Incertidumbre | ±0.025 kg |

Nota. Este cuadro presenta las especificaciones de la pesa eléctrica utilizada en el proceso de esterilización e inoculación.

Cuadro 16. Datos de la placa de la balanza de humedad

| | |
|----------------------|------------|
| Marca | OHAUS |
| Modelo | MB120 |
| Capacidad | 120 g |
| Rango de temperatura | 40-230°C |
| Rango de humedad | 0.01%-100% |
| Incertidumbre | ±0.3 % |

Nota. En este cuadro se detallan las especificaciones de la balanza de humedad utilizada para medir el contenido de humedad en los sustratos, antes y después de la esterilización, así como para medir la humedad del sustrato residual al finalizar el ciclo de cultivo. Su uso permitió obtener valores precisos para comparar la variación de humedad a lo largo del proceso productivo. La balanza permite programar una temperatura de secado específica (°C) y un criterio de finalización basado en la estabilidad de la pérdida de peso (mg/min), lo cual garantiza mediciones precisas y repetibles del contenido de humedad.

Cuadro 17. Datos de la placa de los sensores de temperatura y humedad

| Equipo | Sensor 1 | Sensor 2 |
|----------------------|-------------|-------------|
| Marca | STEREN | STEREN |
| Modelo | TER-120 | TER-150 |
| Rango de temperatura | -20 - 60 °C | -10 - 50 °C |
| Rango de humedad | 20%-95% | 10%-99% |

Nota. Este cuadro describe las especificaciones de cada uno de los sensores de temperatura y humedad utilizados para monitorear las condiciones ambientales durante el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, específicamente en las etapas de incubación y fructificación. Cada sensor fue colocado en una de las estanterías habilitadas para el experimento, permitiendo así un seguimiento más preciso de las variables ambientales en ambas áreas.

Cuadro 18. Datos de la placa de la estufa eléctrica

| | |
|------------------------|----------|
| Marca | Indurama |
| Modelo | Oviedo |
| Voltaje | 220 VCA |
| Frecuencia | 50/60 Hz |
| Potencia Nominal Total | 1600 W |

Nota. Este cuadro describe las especificaciones técnicas de la estufa eléctrica Indurama Oviedo, utilizada en el proceso de esterilización del sustrato. Específicamente, la parrilla del horno fue la utilizada como fuente de calor indirecto para asegurar un tratamiento térmico efectivo del sustrato y así reducir la carga microbiana antes de la inoculación con micelio.

Cuadro 19. Datos de placa de la balanza digital

| | |
|------------------|------------------------|
| Marca | Nordika |
| Modelo | EK5055-31P/EK5055-P |
| Rango de humedad | 0-5 kg |
| Incertidumbre | $\pm 0.001 \text{ kg}$ |

Nota. Este cuadro describe las especificaciones técnicas de la balanza digital, empleada para la medición del peso de los hongos recolectados en cada oleada productiva de *Pleurotus ostreatus*. Además, fue utilizada para determinar el peso del sustrato residual una vez finalizado el ciclo de cultivo.

c) Datos originales

Cuadro 20. Análisis fisicoquímico de la pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala de tres muestras representativas

| Parámetro | | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| % (m/m) | Nitrógeno (N) | 1.84 | 1.78 | 1.77 |
| | Fósforo (P_2O_5) | 0.41 | 0.37 | 0.35 |
| | Potasio (K_2O) | 5.31 | 5.12 | 4.79 |
| | Calcio (CaO) | 0.85 | 0.78 | 0.82 |
| | Magnesio (MgO) | 0.19 | 0.18 | 0.18 |
| | Azufre (S) | 0.13 | 0.12 | 0.12 |
| ppm | Hierro (Fe) | 25.68 | 39.66 | 37.88 |
| | Manganeso (Mn) | 9.91 | 8.50 | 8.47 |
| | Cinc (Zn) | 5.55 | 5.95 | 5.84 |

| | | | | |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|
| | Cobre (Cu) | 12.82 | 10.90 | 10.92 |
| | Boro (B) | 33.91 | 31.38 | 31.86 |
| pH | | 6.30 | 7.38 | 6.65 |
| Relación C/N | | 27.17 | 28.71 | 28.56 |
| % (m/m) | Cenizas | 10.00 | 8.00 | 9.00 |
| | Materia orgánica | 90.00 | 92.00 | 91.00 |
| | Carbono orgánico | 50.00 | 51.11 | 50.55 |

Nota. El cuadro presenta los resultados de los análisis fisicoquímicos de las tres muestras de pulpa de café (*Coffea arabica*) de la Región Occidental de Guatemala enviadas al laboratorio AnaLab. Los datos fueron obtenidos del informe de análisis de abono orgánico O-1, acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017), según el documento OGA-LE-087-18 (OGA, 2024). El informe original se encuentra detallado en la Figura 53.

Cuadro 21. Análisis fisicoquímico de la paja de cuatro muestras representativas

| Párametro | | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
|-----------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| % (m/m) | Nitrógeno (N) | 0.85 | 0.92 | 0.98 | 0.49 |
| | Fósforo (P ₂ O ₅) | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.07 |
| | Potasio (K ₂ O) | 2.33 | 2.36 | 2.57 | 2.15 |
| | Calcio (CaO) | 0.33 | 0.35 | 0.42 | 0.17 |
| | Magnesio (MgO) | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.08 |
| | Azufre (S) | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.08 |
| ppm | Hierro (Fe) | 401.8 | 390.1 | 383.8 | 171.4 |
| | Manganeso (Mn) | 98.10 | 100.2 | 111.8 | 52.84 |
| | Cinc (Zn) | 15.41 | 21.17 | 16.48 | 11.28 |
| | Cobre (Cu) | 9.37 | 22.7 | 9.77 | 6.59 |
| | Boro (B) | 3.54 | 3.89 | 4.25 | 3.74 |
| pH | | 8.49 | 8.46 | 8.47 | 8.43 |

| | | | | | |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|--------|
| Relación C/N | | 58.82 | 55.55 | 25.51 | 105.44 |
| % (m/m) | Cenizas | 10.00 | 8.00 | 55.00 | 7.00 |
| | Materia orgánica | 90.00 | 92.00 | 45.00 | 93.00 |
| | Carbono orgánico | 50.00 | 51.11 | 25.00 | 51.66 |

Nota. El cuadro presenta los resultados de los análisis fisicoquímicos de las cuatro muestras de paja enviadas al laboratorio AnaLab. Los datos fueron obtenidos del informe de análisis de abono orgánico O-1, acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017), según el documento OGA-LE-087-18 (OGA, 2024). El informe original se encuentra detallado en la Figura 54 y Figura 55. Sin embargo, se identificaron varios valores atípicos, para los cuales se les realizó la prueba Q (Ver Cálculo 18). Los datos rechazados como valores atípicos se detallan en el Cuadro 48.

Cuadro 22. Balance de masa general del proceso de esterilización de la pulpa de café como sustrato

| Entradas | |
|-------------------|-------------------|
| Medición | (± 0.025 kg) |
| Sustrato seco | 3.99 |
| Agua | 24.24 |
| Salidas | |
| Medición | (± 0.025 kg) |
| Agua evaporada | 0.08 |
| Sustrato humedo | 10.22 |
| Agua descartada | 18.02 |
| Sólido descartado | 0.24 |

Nota. El cuadro presenta los datos del balance de masa del proceso de esterilización de la pulpa de café (*Coffea arabica*) como sustrato. Los valores incluyen las entradas y salidas del proceso. El sustrato fue dividido para elaborar cada mezcla de sustrato correspondiente (Ver Cuadro 26). En base a la humedad del sustrato (Cuadro 24), se determinó el peso de sustrato seco en cada cubeta (Ver Cuadro 51).

Cuadro 23. Balance de masa general del proceso de esterilización de la paja como sustrato

| Entradas | |
|-----------------|-------------------|
| Medición | (± 0.025 kg) |
| Sustrato seco | 3.34 |
| Agua | 20.69 |
| Salidas | |
| Medición | (± 0.025 kg) |
| Agua evaporada | 0.05 |
| Sustrato humedo | 8.44 |

| | |
|-------------------|-------|
| Agua descartada | 15.54 |
| Sólido descartado | 0.35 |

Nota. El cuadro presenta los datos del balance de masa del proceso de esterilización de la paja como sustrato. Los valores incluyen las entradas y salidas del proceso. El sustrato fue dividido para elaborar cada mezcla de sustrato correspondiente (Ver Cuadro 26). En base a la humedad del sustrato (Cuadro 25), se determinó el peso de sustrato seco en cada cubeta (Ver Cuadro 51).

Cuadro 24. Contenido de humedad de la pulpa de café (*Coffea arabica*) antes y después de la esterilización

| Corrida | Humedad inicial (± 0.3 %) | Humedad posterior a esterilización (± 0.3 %) |
|---------|-----------------------------------|--|
| 1 | 16.40 | 60.10 |
| 2 | 16.39 | 60.18 |
| 3 | 16.44 | 60.21 |

Nota. El cuadro muestra los valores de contenido de humedad en la pulpa de café antes y después de la esterilización. El análisis se realizó en triplicado.

Cuadro 25. Contenido de humedad de la paja antes y después de la esterilización

| Corrida | Humedad inicial (± 0.3 %) | Humedad posterior a esterilización (± 0.3 %) |
|---------|-----------------------------------|--|
| 1 | 1.12 | 60.40 |
| 2 | 1.24 | 60.34 |
| 3 | 1.18 | 60.23 |

Nota. El cuadro muestra los valores de contenido de humedad en la paja antes y después de la esterilización. El análisis se realizó en triplicado.

Cuadro 26. Pesos y mezclas de sustratos en cubetas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Cubeta | Mezcla | Inóculo | Peso cubeta | Pulpa | Paja | Sustrato húmedo total | Peso total |
|--------|------------------|---------|-------------|-------|------|-----------------------|------------|
| | | | | | | | |
| 1 | 100% pulpa | 0.3 | 0.20 | 1.51 | NA | 1.51 | 2.01 |
| 2 | | 0.3 | 0.20 | 1.53 | | 1.53 | 2.03 |
| 3 | | 0.3 | 0.20 | 1.50 | | 1.50 | 2.00 |
| 1 | 100% paja | 0.3 | 0.20 | NA | 1.50 | 1.50 | 2.00 |
| 2 | | 0.3 | 0.20 | | 1.49 | 1.49 | 1.99 |
| 3 | | 0.3 | 0.20 | | 1.50 | 1.50 | 2.00 |
| 1 | 70 pulpa/30 paja | 0.3 | 0.20 | 1.05 | 0.46 | 1.51 | 2.01 |
| 2 | | 0.3 | 0.20 | 1.05 | 0.45 | 1.50 | 2.00 |
| 3 | | 0.3 | 0.20 | 1.07 | 0.45 | 1.52 | 2.02 |
| 1 | 50 pulpa/50 paja | 0.3 | 0.20 | 0.78 | 0.75 | 1.53 | 2.03 |
| 2 | | 0.3 | 0.20 | 0.75 | 0.75 | 1.50 | 2.00 |
| 3 | | 0.3 | 0.20 | 0.75 | 0.75 | 1.50 | 2.00 |

Nota. El cuadro muestra los datos de las mezclas de sustrato utilizadas en las cubetas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (pulpa, paja y combinaciones de ambas). Los pesos de cada cubeta y de las mezclas están especificados.

Cuadro 27. Fechas de inoculación y colonización del micelio en las diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla | Cubeta | Fecha de inoculación | Fecha de colonización |
|------------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 100% pulpa | 1 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 2 | 24/01/25 | 1/02/25 |
| | 3 | 24/01/25 | 1/02/25 |
| 100% paja | 1 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 2 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 3 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 2 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 3 | 24/01/25 | 1/02/25 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 2 | 23/01/25 | 1/02/25 |
| | 3 | 23/01/25 | 1/02/25 |

Nota. El cuadro presenta las fechas de inoculación y colonización del micelio en las distintas mezclas de sustrato utilizadas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. La fecha de inoculación corresponde al día en que se incorporó el inóculo al sustrato (Ver Figura 30), mientras que la fecha de colonización indica el momento en que el micelio cubrió completamente el sustrato (Ver Figura 31). Estos datos permiten analizar la velocidad de colonización del hongo en cada formulación y su relación con el rendimiento productivo.

Cuadro 28. Medición de altura y diámetro del sustrato húmedo en las cubetas al momento de la inoculación

| Cubeta | Mezcla | Altura ($\pm 0.05\text{cm}$) | Diámetro ($\pm 0.05\text{cm}$) |
|--------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 100% pulpa | 15.50 | 13.50 |
| 2 | | 15.60 | |
| 3 | | 15.30 | |
| 1 | 100% paja | 19.00 | |
| 2 | | 19.10 | |
| 3 | | 18.90 | |
| 1 | 70 pulpa/30 paja | 16.80 | |
| 2 | | 16.50 | |
| 3 | | 17.00 | |
| 1 | 50 pulpa/50 paja | 17.50 | |
| 2 | | 17.80 | |

| | | | |
|---|--|-------|--|
| 3 | | 17.50 | |
|---|--|-------|--|

Nota. El cuadro presenta las mediciones de altura y diámetro del sustrato húmedo en cada cubeta para las cuatro mezclas evaluadas. Las dimensiones se emplearon para el cálculo del volumen geométrico del sustrato y, posteriormente, para la determinación de la densidad aparente.

Cuadro 29. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 100% pulpa de café

| Oleada | Cubeta | Formación de primordios | Desarrollo completo de carpóforos y corte |
|--------|--------|-------------------------|---|
| 1 | 1 | 27/02/25 | 2/03/25 |
| | 2 | 14/02/25 | 19/02/25 |
| | 3 | 11/02/25 | 17/02/25 |
| 2 | 1 | 08/03/25 | 12/03/25 |
| | 2 | 26/02/25 | 2/03/25 |
| | 3 | 20/02/25 | 25/02/25 |
| 3 | 1 | 15/03/25 | 21/03/25 |
| | 2 | 8/03/25 | 12/03/25 |
| | 3 | 5/03/25 | 10/03/25 |
| 4 | 1 | 27/03/25 | 1/04/25 |
| | 2 | 20/03/25 | 29/03/25 |
| | 3 | 28/03/25 | 1/04/25 |
| 5 | 1 | 13/04/25 | No se desarrollaron cuerpos fructíferos. |
| | 2 | 08/04/25 | |
| | 3 | 08/04/25 | |

Nota. El cuadro muestra las fechas en la que se empezó la etapa de fructificación del cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando la mezcla de 100% pulpa de café como sustrato. Se registran los momentos de formación de primordios y el desarrollo completo de los carpóforos en cada una de las tres oleadas observadas para cada cubeta. Se puede observar la progresión del ciclo de vida en cada oleada de fructificación. Para la primera oleada, consultar la Figura 39; para la segunda oleada, la Figura 40; para la tercera oleada, en la Figura 41 y para la cuarta oleada en la Figura 42. Las cubetas presentaron indicios de una quinta oleada, sin embargo se evidencian cuerpos fructíferos deformes y que no salían correctamente (Ver Figura 47). Debido a que los hongos no crecieron adecuadamente, se decidió omitir esta oleada y dar por terminado el ciclo.

Cuadro 30. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 100% paja

| Oleada | Cubeta | Formación de primordios | Desarrollo completo de carpóforos y corte |
|--------|--------|-------------------------|---|
| 1 | 1 | 10/02/25 | 15/02/25 |
| | 2 | 7/02/25 | 13/02/25 |
| | 3 | 6/02/25 | 13/02/25 |
| 2 | 1 | 21/02/25 | 02/03/25 |

| | | | |
|---|---|----------|----------|
| | 2 | 17/02/25 | 23/02/25 |
| | 3 | 20/02/25 | 26/02/25 |
| 3 | 1 | 01/04/25 | 11/04/25 |
| | 2 | 29/03/25 | 05/04/25 |
| | 3 | 01/04/25 | 12/04/25 |

Nota. El cuadro muestra las fechas clave en la etapa de fructificación del cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando la mezcla de 100% paja como sustrato. Se registran los momentos de formación de primordios y el desarrollo completo de los carpóforos en cada una de las tres oleadas observadas para cada cubeta. Se puede observar la progresión del ciclo de vida en cada oleada de fructificación. Para la primera oleada, consultar la Figura 36; para la segunda oleada Figura 37; para la tercera oleada, en la Figura 38, en la tercera oleada a pesar de que se hidrató el sustrato correctamente. Algunos los hongos no crecieron adecuadamente, por lo que aquí se dio por terminado el ciclo.

Cuadro 31. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 50pulpa/50 paja

| Oleada | Cubeta | Formación de primordios | Desarrollo completo de carpóforos y corte |
|--------|--------|-------------------------|---|
| 1 | 1 | 13/02/25 | 17/02/25 |
| | 2 | 27/02/25 | 3/03/25 |
| | 3 | 4/03/25 | 8/03/25 |
| 2 | 1 | 26/02/25 | 2/03/25 |
| | 2 | 6/03/25 | 11/03/25 |
| | 3 | 14/03/25 | 20/03/25 |
| 3 | 1 | 26/03/25 | 01/04/25 |
| | 2 | 26/03/25 | 02/04/25 |
| | 3 | 28/03/25 | 05/04/25 |

Nota. El cuadro muestra las fechas clave en la etapa de fructificación del cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando la mezcla de 100% paja como sustrato. Se registran los momentos de formación de primordios y el desarrollo completo de los carpóforos en cada una de las tres oleadas observadas para cada cubeta. Se puede observar la progresión del ciclo de vida en cada oleada de fructificación. Para la primera oleada, consultar la Figura 43; para la segunda oleada, ver Figura 44 ; y para la tercera oleada, ver Figura 45. En la tercera oleada a pesar de que se hidrató el sustrato correctamente. Algunos los hongos no crecieron adecuadamente, por lo que aquí se dio por terminado el ciclo Figura 48.

Cuadro 32. Fechas del ciclo de vida en la etapa de fructificación para la mezcla de 70 pulpa/30 paja

| Oleada | Cubeta | Formación de primordios | Desarrollo completo de carpóforos y corte |
|--------|--------|-------------------------|---|
| 1 | 1 | 13/02/25 | 18/02/25 |
| | 2 | 11/02/25 | 17/02/25 |
| | 3 | 7/02/25 | 13/02/25 |
| 2 | 1 | 22/02/25 | 27/02/25 |

| | | | |
|---|---|----------|---|
| | 2 | 21/02/25 | 27/02/25 |
| | 3 | 19/02/25 | 24/02/25 |
| 3 | 1 | 5/03/25 | 16/03/25 |
| | 2 | 5/03/25 | 14/03/25 |
| | 3 | 09/03/25 | 19/03/25 |
| 4 | 1 | 27/03/25 | No se desarrollaron cuerpos fructíferos |
| | 2 | 27/03/25 | |
| | 3 | 03/04/25 | NA |

Nota. El cuadro muestra las fechas clave en la etapa de fructificación del cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando la mezcla de 100% paja como sustrato. Se registran los momentos de formación de primordios y el desarrollo completo de los carpóforos en cada una de las tres oleadas observadas para cada cubeta. Se puede observar la progresión del ciclo de vida en cada oleada de fructificación. Para la primera oleada, consultar la Figura 33; para la segunda oleada, la Figura 34 y para la tercera oleada, la Figura 35. En el caso de la cuarta oleada, se evidencian cuerpos fructíferos deformes y compactos (Ver Figura 46) se decidió omitir esta oleada y dar por terminado el ciclo.

Cuadro 33. Temperatura del ambiente de cultivo

| Día | Med. 1 (°C) | Med. 2 (°C) | Med. 3 (°C) | Promedio (°C) |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 1 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 2 | 23.7 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.29 |
| 3 | 23.4 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.5 | 23.7 ±0.29 |
| 4 | 23.6 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.29 |
| 5 | 24.1 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.29 |
| 6 | 24.5 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.29 |
| 7 | 24.8 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.29 |
| 8 | 24.3 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.29 |
| 9 | 23.8 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.29 |
| 10 | 23.5 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.29 |
| 11 | 23.3 ±0.5 | 23.8 ±0.5 | 23.7 ±0.5 | 23.6 ±0.29 |
| 12 | 23.7 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.29 |
| 13 | 24.2 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.29 |
| 14 | 25.6 ±0.5 | 26.1 ±0.5 | 26.0 ±0.5 | 25.9 ±0.29 |
| 15 | 25.0 ±0.5 | 25.5 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.29 |
| 16 | 24.4 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.29 |
| 17 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 18 | 23.6 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.29 |
| 19 | 23.4 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.5 | 23.7 ±0.29 |
| 20 | 23.8 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.29 |
| 21 | 24.3 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.29 |
| 22 | 24.8 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.29 |
| 23 | 25.1 ±0.5 | 25.6 ±0.5 | 25.5 ±0.5 | 25.4 ±0.29 |
| 24 | 24.5 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.29 |
| 25 | 24.9 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.29 |

| Día | Med. 1 (°C) | Med. 2 (°C) | Med. 3 (°C) | Promedio (°C) |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 26 | 23.7 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.29 |
| 27 | 23.5 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.29 |
| 28 | 23.3 ±0.5 | 23.8 ±0.5 | 23.7 ±0.5 | 23.6 ±0.29 |
| 29 | 23.8 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.29 |
| 30 | 24.4 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.29 |
| 31 | 24.9 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.29 |
| 32 | 24.8 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.29 |
| 33 | 24.6 ±0.5 | 25.1 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.29 |
| 34 | 24.1 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.29 |
| 35 | 23.8 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.29 |
| 36 | 23.6 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.29 |
| 37 | 23.4 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.5 | 23.7 ±0.29 |
| 38 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 39 | 24.5 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.29 |
| 40 | 25.0 ±0.5 | 25.5 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.29 |
| 41 | 25.3 ±0.5 | 25.8 ±0.5 | 25.7 ±0.5 | 25.6 ±0.29 |
| 42 | 24.7 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.5 | 25.0 ±0.29 |
| 43 | 24.2 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.29 |
| 44 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 45 | 23.7 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.29 |
| 46 | 23.5 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.5 | 23.8 ±0.29 |
| 47 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 48 | 24.6 ±0.5 | 25.1 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.29 |
| 49 | 25.1 ±0.5 | 25.6 ±0.5 | 25.5 ±0.5 | 25.4 ±0.29 |
| 50 | 25.3 ±0.5 | 25.8 ±0.5 | 25.7 ±0.5 | 25.6 ±0.29 |
| 51 | 24.8 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.29 |
| 52 | 24.3 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.29 |
| 53 | 24.0 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.29 |
| 54 | 23.8 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.29 |
| 55 | 23.6 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.29 |
| 56 | 24.0 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.29 |
| 57 | 24.7 ±0.5 | 25.2 ±0.5 | 25.1 ±0.5 | 25.0 ±0.29 |
| 58 | 25.2 ±0.5 | 25.7 ±0.5 | 25.6 ±0.5 | 25.5 ±0.29 |
| 59 | 25.4 ±0.5 | 25.9 ±0.5 | 25.8 ±0.5 | 25.7 ±0.29 |
| 60 | 24.9 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.5 | 25.2 ±0.29 |
| 61 | 24.4 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.5 | 24.7 ±0.29 |
| 62 | 24.1 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.29 |
| 63 | 23.9 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.5 | 24.2 ±0.29 |
| 64 | 23.7 ±0.5 | 24.2 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.29 |
| 65 | 24.0 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.29 |
| 66 | 23.6 ±0.5 | 24.1 ±0.5 | 24.0 ±0.5 | 23.9 ±0.29 |
| 67 | 25.2 ±0.5 | 25.7 ±0.5 | 25.6 ±0.5 | 25.5 ±0.29 |
| 68 | 25.5 ±0.5 | 26.0 ±0.5 | 25.9 ±0.5 | 25.8 ±0.29 |
| 69 | 25.0 ±0.5 | 25.5 ±0.5 | 25.4 ±0.5 | 25.3 ±0.29 |

| Día | Med. 1 (°C) | Med. 2 (°C) | Med. 3 (°C) | Promedio (°C) |
|-----|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 70 | 24.5 ±0.5 | 25.0 ±0.5 | 24.9 ±0.5 | 24.8 ±0.29 |
| 71 | 24.2 ±0.5 | 24.7 ±0.5 | 24.6 ±0.5 | 24.5 ±0.29 |
| 72 | 24.0 ±0.5 | 24.5 ±0.5 | 24.4 ±0.5 | 24.3 ±0.29 |

Nota. El cuadro presenta la temperatura del ambiente de cultivo registrada durante 72 días. Para cada día se consignaron tres lecturas independientes, realizadas en el mismo ambiente y bajo las mismas condiciones de operación. A partir de estas lecturas se obtuvo un promedio diario, el cual se utilizó para verificar la estabilidad térmica del sistema durante el periodo experimental.

Cuadro 34. Humedad relativa del ambiente de cultivo

| Día | Med. 1 (%) | Med. 2 (%) | Med. 3 (%) | Promedio (%) |
|-----|------------|------------|------------|--------------|
| 1 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 2 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 3 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 4 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 5 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 6 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 7 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 8 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 9 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 10 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 11 | 87 ±3 | 90 ±3 | 90 ±3 | 89 ±1.7 |
| 12 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 13 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 14 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 15 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 16 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 17 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 18 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 19 | 88 ±3 | 91 ±3 | 91 ±3 | 90 ±1.7 |
| 20 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 21 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 22 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 23 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 24 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 25 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 26 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 27 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 28 | 88 ±3 | 91 ±3 | 91 ±3 | 90 ±1.7 |
| 29 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 30 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 31 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 32 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |

| Día | Med. 1 (%) | Med. 2 (%) | Med. 3 (%) | Promedio (%) |
|-----|------------|------------|------------|--------------|
| 33 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 34 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 35 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 36 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 37 | 87 ±3 | 90 ±3 | 90 ±3 | 89 ±1.7 |
| 38 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 39 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 40 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 41 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 42 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 43 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 44 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 45 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 46 | 88 ±3 | 91 ±3 | 91 ±3 | 90 ±1.7 |
| 47 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 48 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 49 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 50 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 51 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 52 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 53 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 54 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 55 | 87 ±3 | 90 ±3 | 90 ±3 | 89 ±1.7 |
| 56 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 57 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 58 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 59 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 60 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 61 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 62 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 63 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 64 | 88 ±3 | 91 ±3 | 91 ±3 | 90 ±1.7 |
| 65 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |
| 66 | 83 ±3 | 86 ±3 | 86 ±3 | 85 ±1.7 |
| 67 | 81 ±3 | 84 ±3 | 84 ±3 | 83 ±1.7 |
| 68 | 80 ±3 | 83 ±3 | 83 ±3 | 82 ±1.7 |
| 69 | 82 ±3 | 85 ±3 | 85 ±3 | 84 ±1.7 |
| 70 | 84 ±3 | 87 ±3 | 87 ±3 | 86 ±1.7 |
| 71 | 85 ±3 | 88 ±3 | 88 ±3 | 87 ±1.7 |
| 72 | 86 ±3 | 89 ±3 | 89 ±3 | 88 ±1.7 |

Nota. El cuadro muestra la humedad relativa del ambiente de cultivo registrada a lo largo de 72 días. Para cada día se reportan tres lecturas y su promedio diario, permitiendo comprobar el mantenimiento de condiciones adecuadas de humedad durante el experimento.

Cuadro 35. Datos originales de dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* en cubetas con 100% pulpa

| Oleada | No. Cubeta | Ancho del pïleo | Grosor del estïpite | Largo del estïpite |
|--------|------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| | | | | |
| 1ra | 1 | 10.1 | 1.8 | 2.1 |
| | | 10.0 | 2.0 | 2.3 |
| | | 9.9 | 2.1 | 2.5 |
| | 2 | 9.0 | 2.0 | 2.0 |
| | | 8.7 | 1.8 | 2.3 |
| | | 9.2 | 1.7 | 2.5 |
| | 3 | 8.5 | 1.0 | 2.3 |
| | | 7.5 | 1.0 | 2.5 |
| | | 8.5 | 1.2 | 2.7 |
| 2da | 1 | 8.0 | 1.8 | 3.0 |
| | | 7.4 | 1.5 | 3.1 |
| | | 7.9 | 1.2 | 3.5 |
| | 2 | 7.5 | 1.7 | 3.5 |
| | | 8.3 | 1.5 | 3.0 |
| | | 7.7 | 1.9 | 3.4 |
| | 3 | 7.8 | 1.2 | 2.9 |
| | | 7.5 | 1.4 | 3.3 |
| | | 7.9 | 1.2 | 2.9 |
| 3ra | 1 | 8.8 | 2.5 | 3.4 |
| | | 7.4 | 2.0 | 2.9 |
| | | 7.9 | 2.1 | 3.2 |
| | 2 | 7.6 | 1.5 | 3.2 |
| | | 8.6 | 1.5 | 3.6 |
| | | 8.5 | 1.9 | 3.7 |
| | 3 | 7.4 | 1.4 | 3.9 |
| | | 7.4 | 1.0 | 3.7 |
| | | 7.6 | 1.5 | 3.4 |
| 4ta | 1 | 8.9 | 2.0 | 2.2 |
| | | 8.5 | 1.9 | 2.6 |
| | 2 | 9.5 | 1.0 | 2.5 |
| | | 8.9 | 1.2 | 2.7 |
| | | 8.7 | 1.5 | 2.8 |
| | 3 | 8.9 | 0.9 | 1.8 |
| | | 8.6 | 1.1 | 1.9 |
| | | 8.4 | 1.3 | 2.0 |

Nota. El cuadro representa las dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra) cultivado en cubetas con 100% de pulpa como sustrato, durante tres oleadas de cultivo. Se registraron tres parámetros: el ancho del pïleo, que representa el diámetro del

sombrero del hongo; el grosor del estípite, que mide el grosor del tallo del hongo; y el largo del estípite, que es la longitud del tallo del hongo. Los datos están organizados por oleada y en centímetros, lo que permitirá comparar el crecimiento de los hongos en cada etapa del cultivo.

Cuadro 36. Datos originales de dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* en cubetas con 100% paja

| Oleada | No. Cubeta | Ancho del píleo | Grosor del estípite | Largo del estípite |
|--------|------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| | | | | |
| 1ra | 1 | 9.0 | 1.0 | 3.5 |
| | | 8.0 | 1.4 | 2.0 |
| | | 8.7 | 1.2 | 2.5 |
| | 2 | 8.5 | 2.0 | 3.0 |
| | | 8.5 | 2.5 | 3.0 |
| | | 8.0 | 2.0 | 2.5 |
| | 3 | 7.5 | 2.0 | 2.5 |
| | | 8.0 | 1.5 | 2.5 |
| | | 8.0 | 1.5 | 2.5 |
| 2da | 1 | 10.0 | 2.0 | 1.2 |
| | | 9.0 | 2.1 | 1.0 |
| | | 9.5 | 2.2 | 1.5 |
| | 2 | 8.0 | 2.0 | 2.1 |
| | | 8.0 | 2.0 | 2.1 |
| | | 8.3 | 2.0 | 2.3 |
| | 3 | 8.8 | 2.4 | 3.0 |
| | | 8.5 | 2.0 | 2.9 |
| | | 8.6 | 2.0 | 3.0 |
| 3ra | 1 | 10.1 | 1.9 | 2.3 |
| | | 9.5 | 2.0 | 2.5 |
| | | 9.6 | 2.3 | 2.0 |
| | 2 | 12.0 | 1.2 | 1.5 |
| | | 11.5 | 1.0 | 1.3 |
| | | 11.4 | 1.2 | 1.3 |
| | 3 | 9.6 | 2.0 | 2.6 |
| | | 9.1 | 2.4 | 2.2 |
| | | 9.8 | 2.1 | 1.0 |

Nota. El cuadro representa las dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra) cultivado en cubetas con 100% paja como sustrato, durante tres oleadas de cultivo. Se registraron tres parámetros: el ancho del píleo, que representa el diámetro del sombrero del hongo en centímetros; el grosor del estípite, que mide el grosor del tallo del hongo en centímetros; y el largo del estípite, que es la longitud del tallo del hongo en centímetros.

Los datos están organizados por oleada, lo que permitirá comparar el crecimiento de los hongos en cada etapa del cultivo.

Cuadro 37. Datos originales de dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* en cubetas con 70 pulpa/30 paja

| Oleada | No. Cubeta | Ancho del píleo | Grosor del estípite | Largo del estípite |
|--------|------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| | | ± 0.05 cm | | |
| 1ra | 1 | 8.0 | 1.3 | 3.0 |
| | | 8.0 | 1.8 | 2.7 |
| | | 8.0 | 2.0 | 3.0 |
| | 2 | 6.0 | 1.3 | 2.5 |
| | | 5.9 | 1.5 | 2.3 |
| | | 6.0 | 1.5 | 2.7 |
| | 3 | 7.3 | 1.5 | 2.5 |
| | | 7.0 | 1.0 | 2.0 |
| | | 6.6 | 1.5 | 2.1 |
| 2da | 1 | 9.3 | 1.2 | 2.3 |
| | | 9.2 | 1.4 | 2.5 |
| | | 9.0 | 1.2 | 2.6 |
| | 2 | 8.3 | 1.0 | 2.0 |
| | | 7.9 | 1.1 | 2.3 |
| | | 8.0 | 1.4 | 2.4 |
| | 3 | 9.4 | 2.9 | 1.7 |
| | | 9.0 | 3.0 | 1.5 |
| | | 9.3 | 3.3 | 2.0 |
| 3ra | 1 | 10.0 | 1.6 | 2.5 |
| | | 9.8 | 1.5 | 2.4 |
| | | 10.3 | 1.9 | 2.5 |
| | 2 | 10.0 | 1.5 | 2.1 |
| | | 9.8 | 1.9 | 2.0 |
| | | 9.7 | 1.7 | 2.3 |
| | 3 | 10.5 | 1.5 | 2.3 |
| | | 11.4 | 1.9 | 1.9 |
| | | 11.9 | 1.5 | 2.0 |

Nota. El cuadro representa las dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra) cultivado en cubetas con la mezcla de 70 pulpa/30 paja como sustrato, durante tres oleadas de cultivo. Se registraron tres parámetros: el ancho del píleo, que representa el diámetro del sombrero del hongo en centímetros; el grosor del estípite, que mide el grosor del tallo del hongo en centímetros; y el largo del estípite, que es la longitud del tallo del hongo en centímetros. Los datos están organizados por oleada, lo que permitirá comparar el crecimiento de los hongos en cada etapa del cultivo.

Cuadro 38. Datos originales de dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* en cubetas con 50 pulpa/50 paja

| Oleada | No. Cubeta | Ancho del píleo | Grosor del estípite | Largo del estípite |
|--------|------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| | | $\pm 0.05 \text{ cm}$ | | |
| 1ra | 1 | 7.5 | 1.3 | 3.0 |
| | | 8.0 | 1.5 | 3.4 |
| | | 8.3 | 1.3 | 3.3 |
| | 2 | 8.5 | 1.7 | 1.8 |
| | | 8.0 | 1.5 | 2.0 |
| | | 8.2 | 1.5 | 1.6 |
| | 3 | 10.5 | 1.4 | 3.2 |
| | | 10.7 | 1.5 | 3.5 |
| | | 10.4 | 1.3 | 3.5 |
| 2da | 1 | 9.7 | 1.7 | 2.5 |
| | | 10.0 | 2.0 | 2.0 |
| | | 9.6 | 2.0 | 2.0 |
| | 2 | 9.4 | 1.2 | 2.0 |
| | | 9.0 | 1.0 | 2.1 |
| | | 9.5 | 1.3 | 2.3 |
| | 3 | 9.5 | 1.3 | 1.4 |
| | | 9.8 | 1.2 | 1.5 |
| | | 9.5 | 1.0 | 1.2 |
| 3ra | 1 | 13.5 | 1.5 | 2.0 |
| | | 13.7 | 1.9 | 2.5 |
| | | 10.2 | 2.0 | 1.0 |
| | 2 | 8.5 | 3.0 | 1.2 |
| | | 10.7 | 3.5 | 0.9 |
| | | 9.1 | 2.9 | 1.0 |
| | 3 | 8.1 | 1.3 | 2.1 |
| | | 7.8 | 1.1 | 1.9 |
| | | 7.4 | 1.5 | 2.0 |

Nota. El cuadro representa las dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra) cultivado en cubetas con la mezcla de 50 pulpa/50 paja como sustrato, durante tres oleadas de cultivo. Se registraron tres parámetros: el ancho del píleo, que representa el diámetro del sombrero del hongo en centímetros; el grosor del estípite, que mide el grosor del tallo del hongo en centímetros; y el largo del estípite, que es la longitud del tallo del hongo en centímetros. Los datos están organizados por oleada, lo que permitirá comparar el crecimiento de los hongos en cada etapa del cultivo.

Cuadro 39. Masas de *Pleurotus ostreatus* producidos en cubetas con 100% pulpa de café durante las oleadas de cultivo

| No. Cubeta | Oleada | Masa de hongos producidos (± 0.001 kg) | Masa total de hongos producidos (± 0.001 kg) |
|------------|--------|---|---|
| 1 | 1 | 0.250 | 0.710 |
| | 2 | 0.213 | |
| | 3 | 0.178 | |
| | 4 | 0.069 | |
| 2 | 1 | 0.297 | 0.713 |
| | 2 | 0.206 | |
| | 3 | 0.157 | |
| | 4 | 0.053 | |
| 3 | 1 | 0.289 | 0.693 |
| | 2 | 0.199 | |
| | 3 | 0.164 | |
| | 4 | 0.041 | |

Nota. El cuadro presenta las masas de cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cosechados en cubetas con la mezcla de sustrato de 100% pulpa de café durante cada una de las oleadas de cultivo. Se muestra la masa individual de hongos producida por oleada en cada cubeta, así como la masa total acumulada al finalizar el ciclo productivo. Estos datos fueron utilizados posteriormente para calcular la rendimiento biológico del cultivo.

Cuadro 40. Masas de *Pleurotus ostreatus* producidos en cubetas con 100% paja durante las oleadas de cultivo

| No. Cubeta | Oleada | Masa de hongos producidos (± 0.001 kg) | Masa total de hongos producidos (± 0.001 kg) |
|------------|--------|---|---|
| 1 | 1 | 0.241 | 0.574 |
| | 2 | 0.174 | |
| | 3 | 0.159 | |
| 2 | 1 | 0.297 | 0.575 |
| | 2 | 0.168 | |
| | 3 | 0.110 | |
| 3 | 1 | 0.301 | 0.562 |
| | 2 | 0.152 | |
| | 3 | 0.109 | |

Nota. El cuadro presenta las masas de cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cosechados en cubetas con la mezcla de sustrato de 100% paja durante cada una de las oleadas de cultivo. Se muestra la masa individual de hongos producida por oleada en cada cubeta, así como la masa total acumulada al finalizar el ciclo productivo. Estos datos fueron utilizados posteriormente para calcular la rendimiento biológico del cultivo.

Cuadro 41. Masas de *Pleurotus ostreatus* producidos en cubetas con 70 pulpa /30 paja durante las oleadas de cultivo

| No. Cubeta | Oleada | Masa de hongos producidos (± 0.001 kg) | Masa total de hongos producidos (± 0.001 kg) |
|------------|--------|---|---|
| 1 | 1 | 0.354 | 0.813 |
| | 2 | 0.295 | |
| | 3 | 0.164 | |
| 2 | 1 | 0.365 | 0.817 |
| | 2 | 0.267 | |
| | 3 | 0.185 | |
| 3 | 1 | 0.348 | 0.781 |
| | 2 | 0.246 | |
| | 3 | 0.187 | |

Nota. El cuadro presenta las masas de cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cosechados en cubetas con la mezcla de sustrato 70% pulpa de café y 30% paja durante cada una de las oleadas de cultivo. Se muestra la masa individual de hongos producida por oleada en cada cubeta, así como la masa total acumulada al finalizar el ciclo productivo. Estos datos fueron utilizados posteriormente para calcular la rendimiento biológico del cultivo.

Cuadro 42. Masas de *Pleurotus ostreatus* producidos en cubetas con 50 pulpa/50 paja durante las oleadas de cultivo

| No. Cubeta | Oleada | Masa de hongos producidos (± 0.001 kg) | Masa total de hongos producidos (± 0.001 kg) |
|------------|--------|---|---|
| 1 | 1 | 0.292 | 0.622 |
| | 2 | 0.194 | |
| | 3 | 0.136 | |
| 2 | 1 | 0.281 | 0.604 |
| | 2 | 0.194 | |
| | 3 | 0.129 | |
| 3 | 1 | 0.305 | 0.597 |
| | 2 | 0.191 | |
| | 3 | 0.101 | |

Nota. El cuadro presenta las masas de cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cosechados en cubetas con la mezcla de sustrato de 50 pulpa/50 paja durante cada una de las oleadas de cultivo. Se muestra la masa individual de hongos producida por oleada en cada cubeta, así como la masa total acumulada al finalizar el ciclo productivo. Estos datos fueron utilizados posteriormente para calcular la rendimiento biológico del cultivo.

Cuadro 43. Peso total de las cubetas después del ciclo productivo para diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla | No. Cubeta | Peso total de las cubetas después del ciclo productivo de hongos (± 0.001 kg) |
|------------------|------------|--|
| 100% pulpa | 1 | 1.521 |
| | 2 | 1.487 |
| | 3 | 1.501 |
| 100% paja | 1 | 1.478 |
| | 2 | 1.413 |
| | 3 | 1.471 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 1.137 |
| | 2 | 1.123 |
| | 3 | 1.211 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 1.269 |
| | 2 | 1.255 |
| | 3 | 1.218 |

Nota. El cuadro muestra los pesos totales de las cubetas después de la cosecha de los hongos, junto con el peso del inóculo y el de la cubeta. Los datos se registraron para las diferentes mezclas de sustrato: 100% pulpa de café, 100% paja, 70% pulpa de café / 30% paja, y 50% pulpa de café / 50% paja. Esta información es crucial para el análisis de bidegradación del sustrato.

Cuadro 44. Humedad del sustrato residual en las cubetas de cultivo de *Pleurotus ostreatus* con diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla | No. Cubeta | Humedad del sustrato residual (± 0.3 %) |
|------------------|------------|--|
| 100% pulpa | 1 | 83.9 |
| | 2 | 85.6 |
| | 3 | 84.4 |
| 100% paja | 1 | 68.6 |
| | 2 | 68.5 |
| | 3 | 67.9 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 87.8 |
| | 2 | 88.8 |
| | 3 | 88.1 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 65.4 |
| | 2 | 64.3 |
| | 3 | 63.1 |

Nota. El cuadro muestra la humedad del sustrato residual en las cubetas utilizadas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Se incluyen las mezclas de sustrato utilizadas: 100% pulpa, 100% paja, 70% pulpa/30% paja y 50% pulpa/50% paja, con tres cubetas por mezcla. Los valores de humedad residual se obtuvieron después de la cosecha de los hongos y serán utilizados para determinar el peso seco del sustrato residual.

Cuadro 45. Entalpías estándar de formación de compuestos involucrados en la respiración aeróbica de la glucosa

| Compuesto | ΔH_f° (kcal/mol) | ΔH_f° (kJ/mol) |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Dióxido de carbono (g) | -94.260 | -393.5 |
| Agua (l) | -68.3174 | -285.83 |
| Glucosa (s) | -304.2543 | -1273 |
| Oxígeno (g) | 0 | 0 |

Nota. El cuadro presenta los valores de entalpía estándar de formación, expresados en kcal/mol y kJ/mol, de las especies químicas involucradas en la oxidación aeróbica de la glucosa. Los datos se tomaron del Perry's Chemical Engineers' Handbook. (Green & Southard, 2019).

d) Cálculo de muestra

Cálculo 1. Tamaño de muestra

Ecuación 5. Tamaño de muestra para población finita en estudios cuantitativos.

$$n = \frac{N \cdot (Z)^2 (S)^2}{(E)^2 (N - 1) + (Z)^2 (S)^2}$$

Donde:

N = tamaño de la población conocida.

Z = valor crítico calculado en las tablas del área de la curva normal al 95%

S = varianza de la población en estudio

E = Margen de error

(Aguilar-Barojas, 2005)

$$n = \frac{10 \cdot (1.96)^2 (0.05)^2}{(5\%)^2 (10 - 1) + (1.96)^2 (0.05)^2} = 2.99 \approx 3$$

Nota. El tamaño de muestra se determinó siguiendo la fórmula para población finita, considerando la pulpa de café producida diariamente en la finca como población de estudio. La producción diaria es de 5 toneladas, distribuidas en 10 lotes de media tonelada cada uno. Con los valores de nivel de confianza, desviación estándar y precisión definidos en la metodología, se determinó un tamaño de muestra de 3 unidades de muestreo, equivalentes a 3 lotes, a partir de la cual se tomaron las submuestras necesarias para el análisis

fisicoquímico y para la preparación del sustrato destinado al cultivo experimental de *Pleurotus ostreatus*.

Cálculo 2. Peso seco a partir de su peso húmedo y contenido de humedad.

Ecuación 6. Peso seco del sustrato

$$P_{S_{seco}} = P_{S_{hmedo}} \cdot (1 - H_s)$$

Donde:

$P_{S_{seco}}$ = Peso seco del sustrato (kg)

$P_{S_{hmedo}}$ = Peso total del sustrato húmedo (kg)

H_s = Humedad promedio del sustrato expresada en fracción decimal

Ejemplo del cálculo del peso seco del sustrato contenido en la cubeta para el cultivo:

$$P_{S_{seco}} = P_{S_{hmedo}} \cdot (1 - H_s) = 1.51 \pm 0.025 \text{ kg} (1 - 0.6016 \pm 0.03)$$

$$P_{S_{seco}} = 0.601 \pm 0.0316 \text{ kg}$$

Nota. Este cálculo se realizó para determinar el peso seco del sustrato a partir de su peso húmedo total y el contenido de humedad del sustrato. Para ello, se utilizó la ecuación es el peso total del sustrato húmedo (Cuadro 26) y la humedad promedio de los sustratos (Cuadro 31). Este procedimiento se aplicó en cada cubeta para cada mezcla de sustrato. Los resultados, que incluyen el peso seco del sustrato para cada cubeta, están detallados en el Cuadro 51. De igual forma, se hizo para las mediciones del sustrato residual, utilizando sus pesos húmedos y la humedad residual Cuadro 44. Los resultados de estos cálculos están en el Cuadro 52.

Cálculo 3. Rendimiento biológico (EB) del Cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Ecuación 1. Eficiencia biológica según literatura (Zarate, 2015), tomada como rendimiento biológico

$$EB = \frac{PF_{to}}{PSS}$$

Ejemplo del cálculo de la Eficiencia biológica revisar sección II.e pág.35

$$EB = \frac{PF_{to}}{PSS} \cdot 100 = \frac{0.813 \pm 0.001 \text{ kg}}{0.601 \pm 0.0316 \text{ kg}} = 1.352 \pm 0.07 \%$$

Nota. Este cálculo se realizó con el objetivo de determinar la rendimiento biológico (EB) de cada cubeta de producción. Para ello, se utilizó el peso fresco total de hongos producidos y el peso seco del sustrato correspondiente a cada cubeta. Las masas de los hongos cosechados están registradas en el, Cuadro 39, Cuadro 40, Cuadro 41 y Cuadro 42 mientras

que los pesos del sustrato seco utilizados en el cultivo se presentan en el *Cuadro 51*. El cálculo fue repetido individualmente para cada cubeta de cada mezcla evaluada. Ver resultados en el *Cuadro 53*.

Cálculo 4. Tasa de producción (T_p) del Cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Ecuación 2. Tasa de producción

$$T_p = \frac{EB}{PP} \cdot 100$$

Ejemplo del cálculo de la Tasa de producción revisar sección II.e pág.35

$$T_p = \frac{EB}{PP} \cdot 100 = \frac{1.3532 \pm 0.07}{49 \text{ días}} \cdot 100 = 2.7607 \pm 0.07 \%$$

Nota. Se calculó la tasa de producción la cual que relaciona la Rendimiento biológico (EB) con el Período Productivo (PP), expresado en días. Este parámetro permite identificar el rendimiento del cultivo de *Pleurotus ostreatus* por unidad de tiempo. El cálculo fue realizado para cada una de las cubetas (Ver resultados *Cuadro 53*), empleando los datos de días totales de producción presentados en el *Cuadro 50* y las eficiencias biológicas de cada una determinadas en el *Cuadro 53*.

Cálculo 5. Precocidad en el Cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Ecuación 3. Precocidad

$$P_{cd} = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_n)}{NO}$$

Ejemplo del cálculo Precocidad revisar revisar sección II.e pág.35

$$P_{cd} = \frac{(17 + 9 + 17) \text{ días}}{3 \text{ oleadas productivas}} = 14.33 \approx 15 \text{ días}$$

Nota. Este cálculo se realizó para determinar el tiempo promedio, en días, que tarda el hongo *Pleurotus ostreatus* en alcanzar su madurez y estar listo para la cosecha en cada mezcla de sustrato. Este procedimiento se repitió para cada mezcla de sustrato, utilizando los intervalos de tiempo correspondientes a cada oleada de cultivo, los cuales fueron extraídos del *Cuadro 49*. Dado que los resultados de la precocidad no pueden expresarse en fracciones de día, el cálculo se redondeó al valor entero más cercano, siguiendo el estándar de la medición los resultados se pueden observar en el *Cuadro 54*.

Cálculo 6. Masa del sustrato húmedo final.

$$PSH_{fin} = \text{Peso cubeta}_{\text{después de cosecha}} - (\text{Peso cubeta} - \text{Peso inóculo})$$

Ejemplo del cálculo:

$$PSH_{fin} = 1.172 \pm 0.001 \text{ kg} - (0.20 \pm 0.025 \text{ kg} - 0.30 \pm 0.025 \text{ kg})$$

$$PSH_{fin} = 0.672 \pm 0.035 \text{ kg}$$

Nota. Este cálculo permitió determinar la masa del sustrato húmedo residual después de la cosecha. Para ello, se utilizaron los pesos registrados en el Cuadro 43, a este se le resta el peso de la cubeta vacía y el peso del inóculo al peso total de la cubeta indicados en el Cuadro 26. Este proceso se repitió para cada una de las cubetas de las diferentes mezclas de sustrato (Ver resultados Cuadro 52). Este valor es clave para determinar posteriormente la tasa de biodegradación del sustrato.

Cálculo 7. Biodegradación del sustrato en el Cultivo de *Pleurotus ostreatus*.

Ecuación 4. Biodegradación del sustrato

$$B_s = \frac{(PSH_{ini} - PSH_{fin})}{PSH_{ini}} \cdot 100$$

Ejemplo del cálculo revisar sección II.e pág.35

$$B_s = \frac{(1.51 \pm 0.025 \text{ kg} - 1.021 \pm 0.035 \text{ kg})}{1.51 \pm 0.025 \text{ kg}} \cdot 100 = 32.38 \pm 0.046 \%$$

Nota. Este cálculo permitió determinar el porcentaje de biodegradación del sustrato. Para ello, se utilizó el peso del sustrato húmedo inicial (Cuadro 26), que fue inoculado para permitir el desarrollo del hongo. Una vez completado el ciclo productivo de hongos, se midió el peso del sustrato residual, que se encuentra en el Cuadro 52. Este procedimiento se repitió para cada una de las cubetas con las diferentes mezclas de sustrato, con el fin de identificar la cantidad de sustrato consumido por el hongo. Los resultados obtenidos de estos cálculos están detallados en el Cuadro 56.

Ecuación 7. Primera Ley de la Termodinámica para sistema cerrado.

Cálculo 8. Balance de energía para el proceso de esterilización del sustrato.

$$\Delta E_P + \Delta E_K + \Delta U = Q + W$$

$$\Delta U = Q$$

$$\Delta U = \Delta U_{olla} + \Delta U_{sólido} + \Delta U_{agua} + \Delta U_{evaporación}$$

$Q =$ energía suministrada por la estufa

$$\Delta U = \Delta U_{olla} + \Delta U_{sólido} + \Delta U_{agua} + \Delta U_{evaporación}$$

$$\Delta U_{olla} = \left(1.9 \text{ kg} \cdot 0.447 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (65 - 24.7 \text{ } ^\circ\text{C}) \right) = 29.73 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{\text{sólido}} = \left(3.99 \text{ kg} \cdot 1.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (65 - 24.7 \text{ }^\circ\text{C}) \right) = 195.51 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{\text{agua}} = \left(24.24 \text{ kg} \cdot 4.184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (65 - 24.7 \text{ }^\circ\text{C}) \right) = 3606 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{\text{evaporación}} = \left(0.08 \text{ kg} \cdot 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 180.80 \text{ kJ}$$

Nota. Este cálculo corresponde al balance de energía realizado para estimar la cantidad total de energía interna requerida durante el proceso de esterilización del sustrato utilizado en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. El sistema analizado incluye cuatro componentes: el recipiente, el sustrato sólido (pulpa y/o paja), el agua y el vapor generado por evaporación. La suma de los incrementos de energía interna de cada uno de estos elementos permite estimar el calor total suministrado por la fuente de calor (estufa).

Cálculo 9. Cambio de entalpía estándar de reacción a 25 °C

$$\Delta H_{rxn} = \sum v_i \Delta H_f^\circ (\text{productos}) - \sum v_i \Delta H_f^\circ (\text{reactivos})$$

$$\begin{aligned} \Delta H_f^\circ (\text{productos}) &= [(6 \cdot -393.5 \text{ kJ/mol}) + (6 \cdot -285.83 \text{ kJ/mol})] \\ &= -4075.98 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\Delta H_f^\circ (\text{reactivos}) = [(1 \cdot -1273 \text{ kJ/mol}) + (6 \cdot 0 \text{ kJ/mol})] = -1273 \text{ kJ/mol}$$

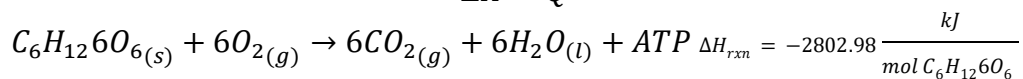
$$\Delta H_{rxn} = -4075.98 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - \left(-1273 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) = -2802.98 \frac{\text{kJ}}{\text{mol } C_6H_{12}6O_6}$$

Nota. Este cálculo se utilizó para determinar el cambio de entalpía estándar de la reacción de respiración de glucosa a presión constante aplicando la regla de Hess. El procedimiento consistió en calcular la suma de las entalpías estándar de formación de los productos y restar la de los reactivos, tomando en cuenta los coeficientes estequiométricos de la reacción balanceada. Para este cálculo se utilizaron los valores de las entalpías estándar de formación de cada compuesto presentados en el Cuadro 45. Al realizar la operación correspondiente se obtuvo un resultado negativo, lo cual confirma que el proceso es exotérmico, es decir, que libera energía en forma de calor hacia el entorno.

Cálculo 10. Balance de energía en la etapa de fructificación de *Pleurotus ostreatus*.

$$\Delta E_p + \Delta E_k + \Delta H = Q + W$$

$$\Delta H = Q$$



$$-2800 \frac{kJ}{mol C_6H_{12}O_6} \cdot \left(\frac{1 mol C_6H_{12}O_6}{6 mol CO_2} \right) = 467.163 \frac{kJ}{mol CO_2}$$

$$0.02762 kg CO_2 \cdot \left(\frac{1000 g CO_2}{1 kg CO_2} \right) \cdot \left(\frac{1 mol CO_2}{44.01 g CO_2} \right) \cdot \left(467.16 \frac{kJ}{mol CO_2} \right) = 293.07 kJ$$

Nota. Este cálculo se realizó con base a que el hongo *Pleurotus ostreatus* descompone la materia orgánica del sustrato en azúcares simples como la glucosa, los cuales son utilizados en su metabolismo a través de respiración aeróbica. A partir de la masa de CO_2 generada por el hongo, obtenida del balance de masa (Figura 16), se estimó la energía metabólica liberada. Se utilizó como modelo la oxidación aeróbica completa de glucosa, permitiendo cuantificar la energía disipada como calor metabólico por el micelio durante la producción de cuerpos fructíferos. Los resultados obtenidos para cada mezcla y cubeta se presentan en el Cuadro 57.

Cálculo 11. Balance de energía de la estufa

$$Q_{suministrado} = P \cdot tiempo de uso$$

$$1600 W \cdot \left(\frac{1 kJ}{1000 J} \right) \cdot 7200 s = 11,520 kJ$$

Nota. Este cálculo presenta la energía suministrada por la estufa durante la esterilización de ambos sustratos. Se utilizó la potencia indicada en el

Cuadro 18 18, correspondiente a los datos de placa de la estufa eléctrica empleada. El sistema presenta pérdidas de calor hacia el ambiente por conducción, convección y radiación; por lo tanto, la energía entregada no coincide íntegramente con el calor útil transferido al agua, al sustrato y al recipiente.

e) Análisis de error

Cálculo 12. Promedio de los datos (Media aritmética).

Ecuación 8. Media aritmética o promedio.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones.

N = Número de observaciones (Skoog et al., 2015).

Ejemplo del cálculo del promedio de la humedad inicial del sustrato.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = \frac{(1.12 + 1.24 + 1.18)\%}{3} = 1.21 \pm 0.031\%$$

Nota. Este cálculo se realizó de la misma forma para todos los cálculos que requieren el promedio de los datos del triplicado obtenidos durante el cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*, incluyendo el análisis fisicoquímico de cada sustrato y las humedades del sustrato (Cuadro 46), las mediciones morfológicas del hongo, rendimiento biológico, la tasa de producción, la tasa de biodegradación del sustrato y la precosidad, entre otros.

Cálculo 13. Desviación estándar de los datos.

Ecuación 9. Desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

X_i = Conjunto de observaciones.

n = Número de observaciones.

\bar{X} = Media aritmética o promedio. (Skoog et al., 2015)

Ejemplo del cálculo de la desviación estándar de la humedad inicial del sustrato (paja).

$$\sigma = \sqrt{\frac{((1.20 - 1.21)^2 + (1.24 - 1.21)^2 + (1.18 - 1.21)^2)\%}{3 - 1}} = 0.031\%$$

Nota. Este cálculo se realizó de la misma forma para todos los análisis que requieren análisis de la variabilidad de los datos mediante la desviación estándar. Los datos obtenidos durante el cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*, incluyendo el análisis fisicoquímico de cada sustrato, las mediciones de humedad del sustrato, las mediciones morfológicas del hongo, entre otros.

Cálculo 14. Coeficiente de variación

Ecuación 10. Coeficiente de variación

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}}\right) \cdot 100$$

Donde:

CV = Coeficiente de variación.

σ = Desviación estándar.

\bar{X} = Media aritmética o promedio. (Skoog et al., 2015)

Ejemplo de cálculo del coeficiente de variación para los parámetros de producción de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato.

$$CV = \left(\frac{1.21}{0.028} \right) \cdot 100 = 2.30\%$$

Nota. Este cálculo se realizó de la misma forma para todos los los parámetros de producción de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato, el coeficiente de variación nos permite medir la dispersión de los datos en relación con su media. Es útil cuando quieres comparar la variabilidad de diferentes parámetros, ya que expresa la variabilidad de manera relativa. Un valor bajo indica alta precisión en los resultados experimentales.

Cálculo 15. Análisis de error para la incertidumbre en operaciones de suma y resta.

Ecuación 11. Propagación de error suma y resta

$$\Delta\delta = \delta\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Donde:

$\Delta\delta$ = Incertidumbre de la magnitud experimental.

Δx ; Δy = Incertidumbre del instrumento de medición.

δ = Magnitud del dato experimental calculado. (Skoog et al., 2015)

$$\Delta\delta = \delta\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Ejemplo del cálculo de la incertidumbre de la masa total de hongos producidos:

$$\Delta\delta = 0.710 \text{ kg} \sqrt{(0.001)^2 + (0.001)^2 + (0.001)^2} = 0.0012$$

Nota. Este cálculo es esencial para entender cómo se combinan las incertidumbres de las mediciones cuando se realizan sumas o restas. En el caso de la masa total de hongos producidos o el sustrato residual. Para este análisis, se utilizaron datos provenientes de los Cuadro 39 Cuadro 40 Cuadro 41 Cuadro 42 y Cuadro 43, que incluyen mediciones de las diferentes variables involucradas en el proceso, como la masa del sustrato húmedo, el peso de la cubeta, la humedad del sustrato residual, entre otros.

Cálculo 16. Análisis de error para la incertidumbre en multiplicación y división.

Ecuación 12. Propagación de error multiplicación y división.

$$\Delta\delta = \delta \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

Donde:

$\Delta\delta$ = Incertidumbre de la magnitud experimental.

Δx ; Δy = Incertidumbre del instrumento de medición.

δ = Magnitud del dato experimental calculado.

x ; y = Magnitud del dato medido. (Skoog et al., 2015)

Ejemplo del cálculo de la incertidumbre del peso seco del sustrato:

$$\Delta\delta = 1.51 \text{ kg} \sqrt{\left(\frac{3\%}{60.16\%}\right)^2 + \left(\frac{0.025 \text{ kg}}{1.51 \text{ kg}}\right)^2} = \pm 0.032 \text{ kg de sustrato seco}$$

Nota. Este cálculo se realizó para determinar la incertidumbre de la magnitud experimental, considerando las incertidumbres de los instrumentos de medición utilizados, así como las magnitudes medidas y la magnitud calculada. En este caso, se calculó la incertidumbre del peso seco del sustrato a partir de las mediciones de humedad, peso de la cubeta. Este procedimiento se utilizó en todos los cálculos relacionados, en las determinaciones de la rendimiento biológico, tasa de producción, tasa de biodegradación del sustrato, entre otros, dependiendo de la naturaleza del cálculo. Además, las incertidumbres de los instrumentos fueron tomadas de la sección (Datos de placa pág. 93), donde se detallan las especificaciones de los equipos utilizados en cada medición.

Cálculo 17. Análisis de error para la incertidumbre de promedios.

Ecuación 13. Propagación de error para el promedio.

$$\Delta\delta_{prom} = \frac{\sqrt{(\Delta\delta_1)^2 + (\Delta\delta_2)^2 \dots}}{n}$$

Donde:

$\Delta\delta_{prom}$ = Incertidumbre del promedio.

n = Número de observaciones.

$\Delta\delta$ = la incertidumbre promedio asociada a cada medición. (Skoog et al., 2015)

Ejemplo de la propagación de error del promedio del rendimiento biológico:

$$\Delta\delta_{prom} = \frac{\sqrt{(0.65)^2 + (0.67)^2 + (0.66)^2}}{3} = 0.037$$

Nota. Este cálculo se realizó para determinar la incertidumbre del promedio de los diferentes parámetros de producción de *Pleurotus ostreatus* en distintas mezclas de sustrato, utilizando los datos obtenidos en triplicado. Para cada medición de parámetros, se utilizó la incertidumbre asociada a cada medición individual, que fue combinada para obtener la incertidumbre total del promedio. Este análisis es fundamental para conocer confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos en experimentos que involucran varias mediciones repetidas en el cultivo de hongos.

Cálculo 18. Prueba Q de Dixon para la detección de valores atípicos.

Ecuación 14. Prueba Q de Dixon muestra pequeña ($n \leq 10$)

$$Q = \frac{|x_c - x_v|}{w}$$

Rechazar sí $Q > Q_{crítica}$

Donde:

Q = es Q experimental.

x_c = valor sospechoso

x_v = valor más proximo al sospechoso

w = diferencia entre el valor máximo y mínimo

$Q_{crítica}$ = valor crítico para el coeficiente de rechazo

(Skoog et al., 2015)

Ejemplo del cálculo de la Prueba Q de Dixon se usa para detectar valores atípicos en una muestra pequeña ($n \leq 10$)

$$Q = \frac{|22.7 - 9.77|}{22.7 - 6.59} = 0.8026$$

Rechazar sí $Q > Q_{crítica}$

$$0.803 > 0.829$$

Se acepta este valor

Nota. Este cálculo se realizó para identificar valores atípicos en los datos obtenidos durante el análisis físicoquímico de la paja como sustrato (Cuadro 21). La prueba Q fue aplicada considerando un nivel de confianza del 95% (Ver Figura 26), para determinar si estos debían ser descartados del cálculo del promedio. Este procedimiento se repitió para todos los valores atípicos identificados en los parámetros de materia orgánica, ceniza, carbono orgánico, manganeso, hierro, cobre, y relación C/N y los resultados de la prueba Q, incluyen la comparación entre los valores calculados y el valor crítico, se encuentran reflejados en el cuadro 46.

Figura 26. Valores críticos para el coeficiente de rechazo Q con 99% de confianza

| Valores críticos para el cociente de rechazo, Q^* | | | |
|---|--|------------------|------------------|
| Número de observaciones | Q_{crit} (Rechazar si $Q > Q_{crit}$) | | |
| | 90% de confianza | 95% de confianza | 99% de confianza |
| 3 | 0.941 | 0.970 | 0.994 |
| 4 | 0.765 | 0.829 | 0.926 |
| 5 | 0.642 | 0.710 | 0.821 |
| 6 | 0.560 | 0.625 | 0.740 |
| 7 | 0.507 | 0.568 | 0.680 |
| 8 | 0.468 | 0.526 | 0.634 |
| 9 | 0.437 | 0.493 | 0.598 |
| 10 | 0.412 | 0.466 | 0.568 |

Nota. Skoog et al., 2015, p. 147.

f) Datos calculados

Cuadro 46. Datos promedio de la humedad inicial y posterior a la esterilización de cada sustrato

| Parámetro | Humedad inicial promedio ($\pm 0.031\%$) | Desviación estándar | Humedad posterior a esterilización promedio ($\pm 0.031\%$) | Desviación estándar |
|---------------|--|---------------------|---|---------------------|
| Pulpa de café | 16.41 | 0.0265 | 60.16 | 0.0006 |
| Paja | 1.18 | 0.0600 | 60.32 | 0.0009 |

Nota. Este cuadro muestra los resultados de la humedad promedio y la desviación estándar de la humedad inicial y posterior a la esterilización para los dos sustratos. Estas mediciones de humedad son fundamentales para conocer el comportamiento del sustrato durante el proceso de esterilización.

Cuadro 47. Densidad aparente del sustrato húmedo.

| Mezcla | Cubeta | Densidad ($\pm 0.016 \text{ kg/m}^3$) | Promedio ($\pm 0.12 \text{ kg/m}^3$) |
|----------------------|--------|--|---|
| 100% pulpa | 1 | 680.6 | 683.6 |
| | 2 | 685.2 | |
| | 3 | 684.9 | |
| 100% paja | 1 | 551.5 | 550.3 |
| | 2 | 545.0 | |
| | 3 | 554.5 | |
| 70% pulpa / 30% paja | 1 | 627.9 | 629.2 |
| | 2 | 635.1 | |
| | 3 | 624.7 | |
| 50% pulpa / 50% paja | 1 | 610.8 | 599.4 |
| | 2 | 588.7 | |
| | 3 | 598.8 | |

Nota. Este cuadro presenta los valores de densidad aparente calculados para cada cubeta correspondiente a las cuatro mezclas de sustrato evaluadas, así como el valor promedio obtenido para cada una de ellas. La densidad aparente se determinó a partir de la masa húmeda del sustrato y del volumen geométrico calculado con base en las dimensiones medidas (altura y diámetro)

Cuadro 48. Resultados de la prueba Q de Dixon para la detección de valores atípicos en los parámetros del análisis físicoquímico de la paja como sustrato

| Parámetro | Valor a revisar | Q | $Q_{critica}$ | Decisión (Aceptar/Rechazar) |
|----------------------------|-----------------|-------|---------------|--------------------------------|
| Relación C/N | 25.51 | 0.376 | 0.829 | Aceptar |
| | 105.44 | 0.583 | | Aceptar |
| Cobre (ppm) | 22.7 | 0.803 | | Aceptar |
| Hierro (ppm) | 171.4 | 0.922 | | Rechazar |
| Manganeso (ppm) | 52.84 | 0.768 | | Aceptar |
| Carbono Orgánico (%m/m) | 25.00 | 0.938 | | Rechazar |
| Ceniza (%m/m) | 55.00 | 0.938 | | Rechazar |
| Materia Orgánica (%m/m) | 45.00 | 0.938 | | Rechazar |

Nota. Este cuadro presenta los resultados de la prueba Q de Dixon aplicada a los datos atípicos obtenidos en el análisis físicoquímico de la paja como sustrato mediante el Cálculo 18 para determinar si los valores debían ser aceptados o rechazados. Los valores rechazados fueron eliminados del cálculo del promedio.

Cuadro 49. Intervalo de tiempo entre oleadas de fructificación para las diferentes mezcla

| Cubeta | Oleada | Días para la obtención de oleadas en la etapa de fructificación | | | |
|--------|--------|---|------------|------------------|------------------|
| | | 100% paja | 100% pulpa | 70 pulpa/30 paja | 50 pulpa/50 paja |
| 1 | 1 | 14 | 29 | 17 | 16 |
| | 2 | 15 | 10 | 9 | 13 |
| | 3 | 39 | 9 | 17 | 30 |
| | 4 | NA | 11 | NA | NA |
| 2 | 1 | 12 | 18 | 16 | 30 |
| | 2 | 10 | 11 | 10 | 8 |
| | 3 | 41 | 10 | 15 | 22 |
| | 4 | NA | 17 | NA | NA |
| 3 | 1 | 12 | 16 | 12 | 35 |
| | 2 | 13 | 8 | 11 | 12 |
| | 3 | 45 | 13 | 23 | 16 |
| | 4 | NA | 22 | NA | NA |

Nota. Este cuadro presenta el intervalo de tiempo entre fases en la etapa de fructificación para cada una de las mezclas. Se muestra el número de días transcurridos entre cada oleada para cada cubeta, utilizando los datos registrados apartir del Cuadro 28, hasta el Cuadro 31. En el caso de la primera oleada, el intervalo se calculó desde la fecha de inoculación hasta el momento del corte. Para las oleadas posteriores, el intervalo se midió desde el corte de la oleada anterior hasta el corte de la siguiente.

Cuadro 50. Duración total del ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus* en cada cubeta para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Mezcla | Cubeta | Duración total del ciclo productivo (Días) |
|------------------|--------|--|
| 100% pulpa | 1 | 68 |
| | 2 | 64 |
| | 3 | 67 |
| 100% paja | 1 | 77 |
| | 2 | 72 |
| | 3 | 79 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 49 |
| | 2 | 50 |
| | 3 | 54 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 68 |
| | 2 | 69 |
| | 3 | 72 |

Nota. Este cuadro presenta la duración total del ciclo productivo, agrupadas por mezcla de sustrato. El cálculo se realizó considerando el intervalo desde la fecha de inoculación del micelio Cuadro 27 hasta la última fecha de cosecha en la que se recolectaron cuerpos fructíferos durante la última oleada productiva significativa. Las fechas correspondientes a

cada oleada se detallan en el Cuadro 30, Cuadro 31 y Cuadro 32, según la mezcla de sustrato utilizada.

Cuadro 51. Pesos de sustrato seco en cubetas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Cubeta | Mezcla | Pulpa seca | Paja seca | Sustrato seco total |
|--------|------------------|--------------------|-----------|---------------------|
| | | (± 0.0316 kg) | | |
| 1 | 100% pulpa | 0.60 | NA | 0.602 |
| 2 | | 0.58 | | 0.578 |
| 3 | | 0.57 | | 0.567 |
| 1 | 100% paja | NA | 0.60 | 0.60 |
| 2 | | | 0.59 | 0.59 |
| 3 | | | 0.60 | 0.60 |
| 1 | 70 pulpa/30 paja | 0.42 | 0.18 | 0.601 |
| 2 | | 0.42 | 0.18 | 0.597 |
| 3 | | 0.41 | 0.17 | 0.579 |
| 1 | 50 pulpa/50 paja | 0.31 | 0.30 | 0.61 |
| 2 | | 0.30 | 0.30 | 0.60 |
| 3 | | 0.30 | 0.30 | 0.60 |

Nota. Este cuadro presenta los pesos de sustrato seco de cada uno de los sustratos utilizados en las mezclas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en cada cubeta de cultivo. Los datos incluyen los pesos secos de cada sustrato, así como el total por cubeta, de acuerdo con el tipo de mezcla utilizada. Estos datos fueron recopilados para determinar el rendimiento biológico de la producción de hongos. Para estos resultados, se utilizó la humedad de cada sustrato posterior a la esterilización, cuyos valores están presentados en el Cuadro 46.

Cuadro 52. Masas del sustrato final en cubetas con diferentes mezclas de sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Mezcla | No. Cubeta | Masa del sustrato húmedo final (± 0.035 kg) | Masa del sustrato seco final (± 0.035 kg) |
|------------------|------------|--|--|
| 100% pulpa | 1 | 1.021 | 0.164 |
| | 2 | 0.987 | 0.142 |
| | 3 | 1.001 | 0.156 |
| 100% paja | 1 | 0.978 | 0.307 |
| | 2 | 0.913 | 0.288 |
| | 3 | 0.971 | 0.312 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 0.637 | 0.078 |
| | 2 | 0.623 | 0.070 |
| | 3 | 0.711 | 0.085 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 0.769 | 0.266 |
| | 2 | 0.755 | 0.270 |
| | 3 | 0.718 | 0.265 |

Nota. Este cuadro presenta los pesos del sustrato húmedo final después de la fructificación en cubetas con diferentes mezclas de sustrato utilizadas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Los datos incluyen el peso total del sustrato después de la cosecha de los hongos obtenido por medio del Cálculo 6. Además, se presenta la masa del sustrato seco final, la cual fue calculada utilizando Cálculo 2, considerando la humedad promedio del sustrato residual después de la cosecha.

Cuadro 53. Rendimiento biológico y tasa de producción del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en las distintas mezclas de sustrato por cubeta

| Mezcla | Cubeta | Rendimiento biológico (EB) (± 0.07) | Tasa de producción (Tp) (± 0.07 %) |
|------------------|--------|--|--|
| 100% pulpa | 1 | 1.180 | 1.74 |
| | 2 | 1.233 | 1.93 |
| | 3 | 1.223 | 1.82 |
| 100% paja | 1 | 0.964 | 1.25 |
| | 2 | 0.975 | 1.35 |
| | 3 | 0.947 | 1.20 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 1.353 | 2.60 |
| | 2 | 1.369 | 2.74 |
| | 3 | 1.349 | 2.50 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 1.023 | 1.50 |
| | 2 | 1.013 | 1.47 |
| | 3 | 1.001 | 1.39 |

Nota. Este cuadro muestra la rendimiento biológico (EB) obtenida en cada una de las cubetas utilizadas en el experimento, agrupadas según la mezcla de sustrato empleada. Este cálculo se realizó utilizando el peso fresco total de los hongos producidos y el peso seco del sustrato de cada cubeta, por medio del Cálculo 3 aplicando la Ecuación 1. Eficiencia biológica. Ahora en el tasa de Producción (Tp), se calcula en función de la EB y el tiempo de cultivo. El cálculo fue realizado para cada una de las cubetas por medio del Cálculo 4 aplicando la Ecuación 2. Tasa de producción.

Cuadro 54. Precosidad en días para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla | Cubeta | Precosidad (días) |
|------------------|--------|-------------------|
| 100% pulpa | 1 | 15 |
| | 2 | 14 |
| | 3 | 15 |
| 100% paja | 1 | 23 |
| | 2 | 21 |
| | 3 | 23 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 15 |
| | 2 | 14 |
| | 3 | 15 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 20 |

| | | |
|--|---|----|
| | 2 | 20 |
| | 3 | 21 |

Nota. Este cuadro presenta los valores de precocidad en días para cada cubeta de las diferentes mezclas de sustrato utilizadas en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. La precocidad se refiere al tiempo promedio necesario para que los hongos alcancen su madurez y estén listos para la cosecha. Se repitió el procedimiento para cada mezcla de sustrato a partir del Cálculo 5 aplicando la Ecuación 3 de Precocidad.

Cuadro 55. Dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* por oleada de cultivo para las diferentes mezclas de sustrato

| Mezcla de sustrato | Oleada | Ancho del Píleo (± 0.02 cm) | Grosor del estípite (± 0.02 cm) | Largo del estípite (± 0.02 cm) |
|--------------------|--------|-------------------------------------|---|--|
| 100% Paja | 1ra. | 8.2 | 1.6 | 2.6 |
| | 2da. | 8.7 | 2.1 | 2.1 |
| | 3ra. | 10.4 | 1.8 | 1.9 |
| 100% Pulpa | 1ra. | 9.2 | 1.8 | 2.3 |
| | 2da. | 7.7 | 1.5 | 3.2 |
| | 3ra. | 7.9 | 1.8 | 3.4 |
| | 4ta. | 8.8 | 1.4 | 2.4 |
| 70 pulpa/30 paja | 1ra. | 7.1 | 1.5 | 2.5 |
| | 2da. | 8.6 | 1.7 | 2.2 |
| | 3ra. | 10.3 | 1.8 | 2.2 |
| 50 pulpa/50 paja | 1ra. | 8.6 | 1.4 | 2.7 |
| | 2da. | 9.6 | 1.5 | 2.0 |
| | 3ra. | 10.1 | 2.0 | 1.6 |

Nota. Este cuadro presenta las dimensiones morfológicas promedio de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cultivados en distintas mezclas de sustrato, diferenciadas por oleadas de cultivo. Para cada mezcla, se midieron en triplicado los hongos cosechados por cubeta durante cada oleada. Posteriormente, se calculó el promedio de las mediciones por oleada considerando las tres cubetas representativas de cada mezcla. Los datos utilizados provienen del Cuadro 35, Cuadro 36, Cuadro 37 y Cuadro 38, para analizar cómo varían las dimensiones (ancho del píleo, grosor y largo del estípite) a lo largo del ciclo productivo.

Cuadro 56. Biodegradación del sustrato del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en las distintas mezclas de sustrato por cubeta

| Mezcla | Cubeta | Tasa de biodegradación del sustrato en base húmeda (± 0.046 %) | Tasa de biodegradación del sustrato en base seca (± 0.038 %) |
|------------|--------|--|--|
| 100% pulpa | 1 | 32.38 | 72.8 |
| | 2 | 35.32 | 75.4 |
| | 3 | 33.09 | 72.5 |
| | 1 | 34.80 | 48.8 |

| | | | |
|------------------|---|-------|------|
| 100% paja | 2 | 38.56 | 51.2 |
| | 3 | 35.09 | 48.0 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 57.81 | 87.0 |
| | 2 | 58.47 | 88.3 |
| | 3 | 53.22 | 85.3 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 49.74 | 56.4 |
| | 2 | 49.67 | 55.0 |
| | 3 | 52.13 | 55.8 |

Nota. Este cuadro presenta el cálculo de la masa de sustrato consumido durante el ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus*. Se incluyen las mezclas de sustrato utilizadas, y se calculó el porcentaje de biodegradación del sustrato a partir del Cálculo 7 aplicando la Ecuación 4. Biodegradación del sustrato Este análisis es esencial para determinar la cantidad de sustrato consumido por el hongo y, de esta manera, verificar la eficiencia del proceso de cultivo.

Cuadro 57. Energía metabólica liberada durante la etapa de fructificación de *Pleurotus ostreatus* a partir de la masa de CO_2 generada por cubeta

| Mezcla | No. Cubeta | Masa de CO_2 (± 0.035 kg) | Moles de CO_2 (± 0.17 kg) | Energía (± 0.81 kJ) |
|------------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 100% pulpa | 1 | 0.02762 | 0.628 | 293.071 |
| | 2 | 0.02287 | 0.520 | 242.700 |
| | 3 | 0.01784 | 0.405 | 189.347 |
| 100% paja | 1 | 0.01891 | 0.430 | 200.637 |
| | 2 | 0.02740 | 0.623 | 290.801 |
| | 3 | 0.02631 | 0.598 | 279.171 |
| 70 pulpa/30 paja | 1 | 0.01029 | 0.234 | 109.147 |
| | 2 | 0.01022 | 0.232 | 108.489 |
| | 3 | 0.01339 | 0.304 | 142.095 |
| 50 pulpa/50 paja | 1 | 0.02193 | 0.498 | 232.662 |
| | 2 | 0.02646 | 0.601 | 280.826 |
| | 3 | 0.03806 | 0.865 | 403.842 |

Nota. Este cuadro presenta la estimación de la energía metabólica del micelio de *Pleurotus ostreatus* durante la fase de fructificación, calculada en función de la masa de dióxido de carbono (CO_2) generada en cada cubeta.

Cuadro 58. Parámetros estadísticos de la rendimiento biológico (EB) de *Pleurotus ostreatus* en las cuatro mezclas de sustrato

| Mezcla de sustrato | Promedio | Desviación estándar | Coefficiente de variación (%) |
|--------------------|------------------|---------------------|-------------------------------|
| 100% pulpa de café | 1.21 ± 0.066 | $0.028 \pm 0.11\%$ | $2.30 \pm 0.3\%$ |
| 100% paja | 0.96 ± 0.051 | $0.014 \pm 0.08\%$ | $1.49 \pm 0.2\%$ |
| 70% pulpa/30% paja | 1.36 ± 0.053 | $0.010 \pm 0.09\%$ | $0.80 \pm 0.3\%$ |

| | | | |
|--------------------|------------|---------------|-----------|
| 50% pulpa/50% paja | 1.01±0.073 | 0.011 ± 0.12% | 1.06±0.2% |
|--------------------|------------|---------------|-----------|

Nota. Este cuadro presenta los valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de la rendimiento biológico (EB) obtenida en cada una de las mezclas de sustrato utilizadas en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Estos parámetros estadísticos permiten comparar el rendimiento de cada combinación y evaluar la consistencia de los datos experimentales.

Cuadro 59. Análisis ANOVA de la duración total del ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Origen de variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | Valor F | Probabilidad | Valor crítico F |
|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------|------------------------|-----------------|
| Entre grupos | 928.6667 | 3 | 309.5556 | 48.24 | 1.813x10 ⁻⁵ | 4.0662 |
| Dentro de los grupos | 51.3333 | 8 | 6.4167 | | | |
| Total | 980 | 11 | 89.0909 | | | |

Nota. Este cuadro muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula, que indica que no existe diferencia significativa entre las medias de la duración total del ciclo productivo en las diferentes mezclas de sustrato; y 2) Hipótesis alternativa, que indica que las medias son diferentes según la mezcla utilizada. Este análisis se realizó con una significancia de 0.05 en Excel.

Cuadro 60. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la duración total del ciclo productivo

| Mezcla | Diferencia de medias | Error estándar (SE) | Q calculado | Q crítico | p-valor | Conclusión |
|---------|----------------------|---------------------|-------------|-----------|-----------|--------------------------|
| x1 – x2 | 9.6667 | 1.4625 | 6.6397 | 6.6234 | 0.006929 | Diferencia significativa |
| x1 – x3 | 14.3333 | | 9.8006 | 6.6234 | 0.0005508 | Diferencia significativa |
| x1 – x4 | 3.3333 | | 2.2792 | 6.6234 | 0.4243 | No significativa |
| x2 – x3 | 24.0000 | | 16.4103 | 6.6234 | 0.0000129 | Diferencia significativa |
| x2 – x4 | 6.3333 | | 4.3305 | 6.6234 | 0.06093 | No significativa |
| x3 – x4 | 17.6667 | | 12.0798 | 6.6234 | 0.0001257 | Diferencia significativa |

Nota. Este cuadro presenta los resultados de la prueba de Tukey para comparar las medias de la duración total del ciclo productivo en las distintas mezclas de sustrato. Las

mezclas se codificaron de la siguiente forma: x1 = 100 % pulpa de café, x2 = 100 % paja, x3 = 70 % pulpa / 30 % paja, y x4 = 50 % pulpa / 50 % paja. Se muestran las comparaciones por pares entre las mezclas, la diferencia de medias, el error estándar, los valores de Q calculado y Q crítico, el valor p y la conclusión. Las combinaciones con un valor de Q calculado mayor al Q crítico y un valor p menor a 0.05 se consideran estadísticamente diferentes.

Cuadro 61. Análisis ANOVA de la tasa de producción en diferentes mezclas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Origen de variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | Valor F | Probabilidad | Valor crítico F |
|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------|-----------------------|-----------------|
| Entre grupos | 3.1896 | 3 | 1.0632 | 128.1847 | 4.21x10 ⁻⁷ | 4.0662 |
| Dentro de los grupos | 0.06635 | 8 | 0.008294 | | | |
| Total | 3.256 | 11 | 0.296 | | | |

Nota. Este cuadro muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula, que indica que no existe diferencia significativa entre las medias de la tasa de producción en las diferentes mezclas de sustrato; y 2) Hipótesis alternativa, que indica que las medias son diferentes según la mezcla utilizada. Este análisis se realizó con una significancia de 0.05 en Excel

Cuadro 62. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la tasa de producción

| Mezcla | Diferencia de medias | Error estándar (SE) | Q calculado | Q crítico | p-valor | Conclusión |
|---------|----------------------|---------------------|-------------|-----------|-------------|--------------------------|
| x1 – x2 | 0.5603 | 0.05258 | 10.6565 | 5.51 | 0.4684 | Diferencia significativa |
| x1 – x3 | 0.7837 | | 14.904 | 5.51 | 0.000003793 | Diferencia significativa |
| x1 – x4 | 0.3753 | | 4.5356 | 5.51 | 0.00003704 | No significativa |
| x2 – x3 | 1.3440 | | 25.5605 | 5.51 | 0.000009255 | Diferencia significativa |
| x2 – x4 | 0.1850 | | 3.5184 | 5.51 | 0.0001231 | No significativa |
| x3 – x4 | 5.9867 | | 5.0492 | 5.51 | 0.02991 | Diferencia significativa |

Nota. Este cuadro presenta los resultados de la prueba de Tukey para comparar las medias de la tasa de producción en las distintas mezclas de sustrato. Las mezclas se

codificaron de la siguiente forma: x1 = 100 % pulpa de café, x2 = 100 % paja, x3 = 70 % pulpa / 30 % paja, y x4 = 50 % pulpa / 50 % paja. Se muestran las comparaciones por pares entre las mezclas, la diferencia de medias, el error estándar, los valores de Q calculado y Q crítico, el valor p y la conclusión. Las combinaciones con un valor de Q calculado mayor al Q crítico y un valor p menor a 0.05 se consideran estadísticamente diferentes.

Cuadro 63. Análisis ANOVA de la tasa de biodegradación del sustrato en diferentes mezclas para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

| Origen de variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado medio | Valor F | Probabilidad | Valor crítico F |
|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------|------------------------|-----------------|
| Entre grupos | 1105.1428 | 3 | 368.3809 | 87.3475 | 1.873x10 ⁻⁶ | 4.0662 |
| Dentro de los grupos | 33.7393 | 8 | 4.2174 | | | |
| Total | 1138.8822 | 11 | 103.5347 | | | |

Nota. Este cuadro muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula, que indica que no existe diferencia significativa entre las medias de la tasa de biodegradación del sustrato en las diferentes mezclas de sustrato; y 2) Hipótesis alternativa, que indica que las medias son diferentes según la mezcla utilizada. Este análisis se realizó con una significancia de 0.05 en Excel

Cuadro 64. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey para la tasa de biodegradación del sustrato

| Mezcla | Diferencia de medias | Error estándar (SE) | Q calculado | Q crítico | p-valor | Conclusión |
|---------|----------------------|---------------------|-------------|-----------|-------------|--------------------------|
| x1 – x2 | 2.5533 | 1.1857 | 2.1535 | 5.3697 | 0.4684 | No significativa |
| x1 – x3 | 22.9033 | | 19.3168 | 5.3697 | 0.000003793 | Diferencia significativa |
| x1 – x4 | 16.9167 | | 14.2676 | 5.3697 | 0.00003704 | Diferencia significativa |
| x2 – x3 | 20.3500 | | 17.1633 | 5.3697 | 0.000009255 | Diferencia significativa |
| x2 – x4 | 14.3633 | | 12.1141 | 5.3697 | 0.0001231 | Diferencia significativa |
| x3 – x4 | 5.9867 | | 5.0492 | 5.3697 | 0.02991 | Diferencia significativa |

Nota. Este cuadro presenta los resultados de la prueba de Tukey para comparar las medias de la tasa de biodegradación del sustrato en las distintas mezclas de sustrato. Las mezclas se codificaron de la siguiente forma: x1 = 100 % pulpa de café, x2 = 100 % paja,

x3 = 70 % pulpa / 30 % paja, y x4 = 50 % pulpa / 50 % paja. Se muestran las comparaciones por pares entre las mezclas, la diferencia de medias, el error estándar, los valores de Q calculado y Q crítico, el valor p y la conclusión. Las combinaciones con un valor de Q calculado mayor al Q crítico y un valor p menor a 0.05 se consideran estadísticamente diferentes.

Cuadro 65. Cantidad de insumos utilizados en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Descripción | Costo Unitario (Q) | 100% pulpa | 100% paja | 50 % pulpa / 50 % paja | 70 % pulpa / 30 % paja |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| | | Cantidad utilizada | | | |
| Pulpa de café | 2.00 / kg | 4.5 kg | 0 kg | 2.25 kg | 3.15 kg |
| Agua | 0.02 / L | 40 L | 40 L | 40 L | 40 L |
| Energía | 1.47 / kWh | 0.8 kWh | 0.8 kWh | 0.8 kWh | 0.8 kWh |
| Micelio | 77.00 / kg | 0.9 kg | 0.9 kg | 0.9 kg | 0.9 kg |
| Paja | 6.48 / kg | 0 kg | 4.5 kg | 2.25 kg | 1.35 kg |
| Recipiente para cultivo | 12.50/ unidad | 3 | 3 | 3 | 3 |

Nota. Este cuadro presenta el detalle de la cantidad de cada insumo empleado (pulpa de café, paja, agua, energía, micelio y cubetas de cultivo) para las formulaciones experimentales: 100 % pulpa, 100 % paja, 70 % pulpa / 30 % paja y 50 % pulpa / 50 % paja.

Cuadro 66. Costos asociados a los insumos utilizados en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en diferentes mezclas de sustrato

| Descripción | 100% pulpa | 100% paja | 70 % pulpa / 30 % paja | 50 % pulpa / 50 % paja |
|---------------|------------|-----------|------------------------|------------------------|
| | Costo (Q) | | | |
| Pulpa de café | 9.00 | 0.00 | 6.3 | 4.5 |
| Agua | 0.80 | 0.80 | 0.8 | 0.8 |
| Energía | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 |
| Micelio | 69.30 | 69.30 | 69.3 | 69.3 |

| | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Paja | 0.00 | 29.18 | 8.8 | 14.6 |
| Cubetas para el cultivo | 37.50 | 37.50 | 37.5 | 37.5 |
| Costo total | 117.78 | 137.95 | 123.83 | 4.5 |
| Costo por kg de hongo (Q/kg) | 55.66 | 80.63 | 62.83 | 70.14 |

Nota. Este cuadro muestran los costos calculados en quetzales (Q) para cada uno de los insumos, de acuerdo con las cantidades utilizadas en las cuatro formulaciones experimentales. Se incluye el costo total de producción por cada mezcla de sustrato.

Cuadro 67. Requerimientos energéticos del proceso de esterilización del sustrato con pulpa de café y paja

| | Pulpa de café | Paja |
|-------------------------------|---------------|------------|
| $\Delta U_{recipiente}$ | 34.23 kJ | 48.3 kJ |
| $\Delta U_{sólido}$ | 305.51 kJ | 175.0 kJ |
| $\Delta U_{agua\ descartada}$ | 2969.05 kJ | 2622.53 kJ |
| $\Delta U_{evaporación}$ | 201.50 kJ | 125.9 kJ |
| $\Delta U_{agua\ retenida}$ | 1106.64 kJ | 858.8 kJ |

Nota. Este cuadro presenta la energía requerida para esterilizar los sustratos utilizados en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, específicamente pulpa de café y paja. Los cálculos incluyen la energía absorbida por el recipiente, el sustrato sólido, el agua líquida y el agua evaporada durante el proceso. La energía total reflejada representa el requerimiento energético, necesario para alcanzar las condiciones de esterilización.

Cuadro 68. Composición fisicoquímica de la mezcla 70 % pulpa de café / 30 % paja (base seca)

| Párametro | | Composición estimada |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| % (m/m) Base seca | Nitrógeno (N) | 1.503 |
| | Fósforo (P_2O_5) | 0.305 |
| | Potasio (K_2O) | 4.254 |
| | Calcio (CaO) | 0.670 |
| | Magnesio (MgO) | 0.165 |
| | Azufre (S) | 0.114 |
| ppm | Hierro (Fe) | 141.66 |
| | Manganeso (Mn) | 33.50 |
| | Cinc (Zn) | 8.87 |

| | | |
|----------------------|------------------|--------|
| | Cobre (Cu) | 11.72 |
| | Boro (B) | 23.82 |
| pH | | 7.29 |
| Relación C/N | | 33.7 |
| % (m/m) Base seca | Cenizas | 8.799 |
| | Materia Orgánica | 91.201 |
| | Carbono Orgánico | 50.661 |

Nota. Este cuadro presenta la composición fisicoquímica estimada de la mezcla de sustrato conformada por 70 % pulpa de café y 30 % paja, expresada en base seca. Los macronutrientes y los parámetros de composición orgánica se reportan en porcentaje en masa (% m/m), mientras que los micronutrientes se expresan en partes por millón (ppm). El pH y la relación C/N corresponden a valores calculados a partir de los promedios ponderados de ambos materiales, considerando sus proporciones en la mezcla. Esta caracterización permite describir el balance nutricional y las condiciones químicas del sustrato asociado al mejor desempeño productivo de *Pleurotus ostreatus*.

g) Imágenes de experimentación

Figura 27. Proceso de despulpado de café (*Coffea arabica*) por vía húmeda para la obtención de pulpa utilizada como sustrato



Nota. Elaboración propia, realizado en finca cafetalera de la región de Huehuetenango, Guatemala, 2025.

Figura 28. Esterilización de los sustratos por inmersión en agua caliente



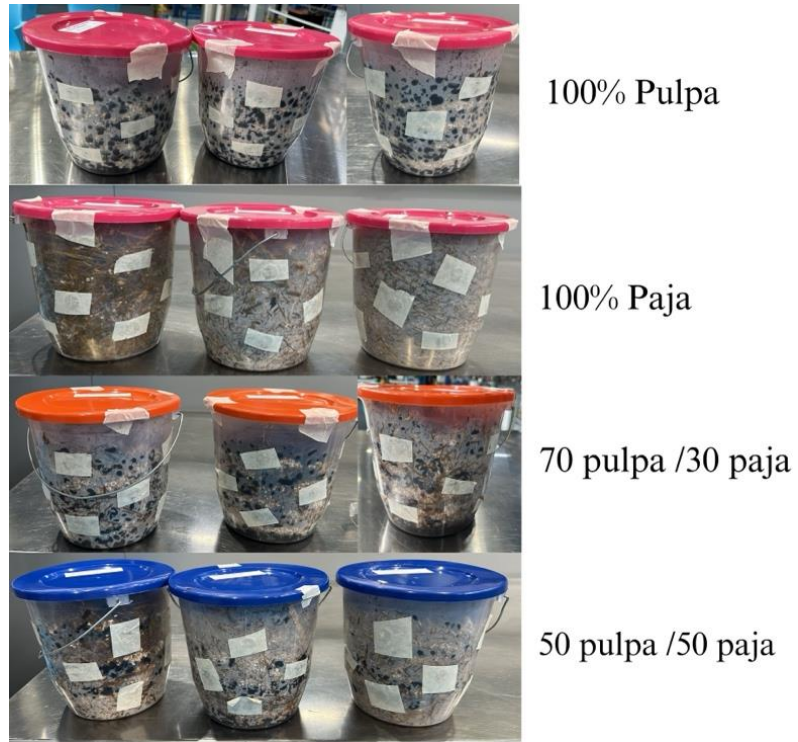
Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 29. Sustratos esterilizados para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*: paja (izquierda) y pulpa de café (derecha)



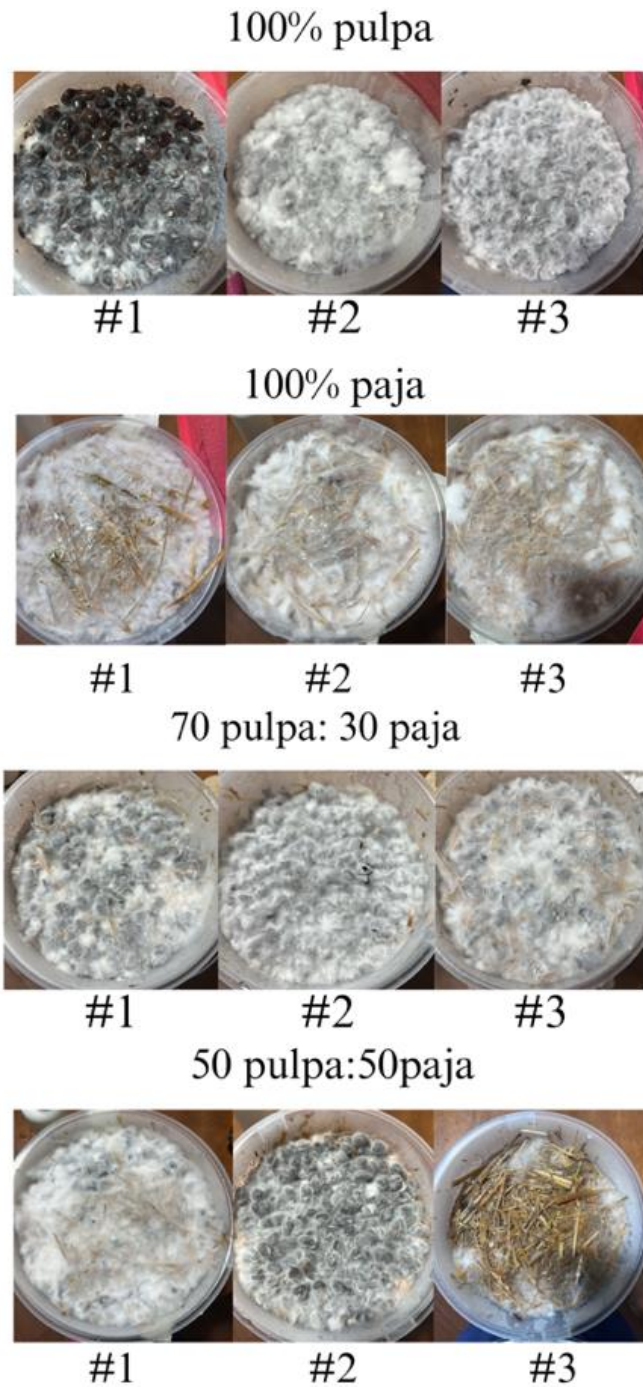
Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 30 Inoculación del micelio en sus diferentes combinaciones de sustrato



Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 31. Proceso de incubación de las diferentes mezclas de sustrato después de 7 días



Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 32. Montaje experimental durante la etapa de fructificación de *Pleurotus ostreatus*



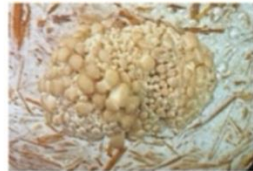
Nota. Elaboración propia.

Figura 33. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 70% pulpa y 30% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven

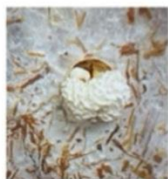


Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 34. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 70% pulpa y 30% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven

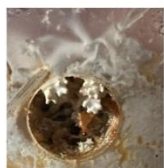


Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 35. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 70% pulpa y 30% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 36. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 37. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 38. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 39. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% pulpa de café

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 40. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% pulpa de café

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 41. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% pulpa de café

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 42. Ciclo de vida de la cuarta oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 100% pulpa de café

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 43. Ciclo de vida de la primera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 50% pulpa y 50% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 44. Ciclo de vida de la segunda oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 50% pulpa y 50% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 45. Ciclo de vida de la tercera oleada de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en 50% pulpa y 50% paja

Cubeta 1



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 2



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Cubeta 3



Primordio



Cuerpo fructífero joven



Cuerpo fructífero en desarrollo



Cuerpo fructífero adulto listo para cosecha

Nota. Elaboración propia.

Figura 46. Indicadores de agotamiento del sustrato en la cuarta oleada del cultivo con mezcla 70 % pulpa/30 % paja

Cubeta 1 70 pulpa/ 30 paja
Oleada 4



Cubeta 2 70 pulpa/ 30 paja
Oleada 4



Cubeta 3 70 pulpa/ 30 paja
Oleada 4



Nota. Elaboración propia.

Figura 47. Indicadores de agotamiento del sustrato en la quinta oleada del cultivo con mezcla 100 % pulpa de café

Cubeta 1 100% pulpa
Oleada 5



Cubeta 2 100% pulpa
Oleada 5



Cubeta 3 100% pulpa
Oleada 5



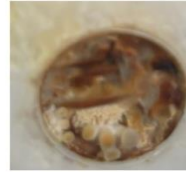
Nota. Elaboración propia.

Figura 48. Indicadores de agotamiento del sustrato en la tercera oleada del cultivo con mezcla 50 % pulpa/50 % paja

Cubeta 1 50 pulpa/50 paja
Oleada 3



Cubeta 2 50 pulpa/50 paja
Oleada 3



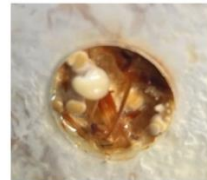
Cubeta 3 50 pulpa/50 paja
Oleada 3



Nota. Elaboración propia.

Figura 49. Indicadores de agotamiento del sustrato en la tercera oleada del cultivo con mezcla 100 % paja

Cubeta 1 100%paja
Oleada 3



Cubeta 2 100%paja
Oleada 3

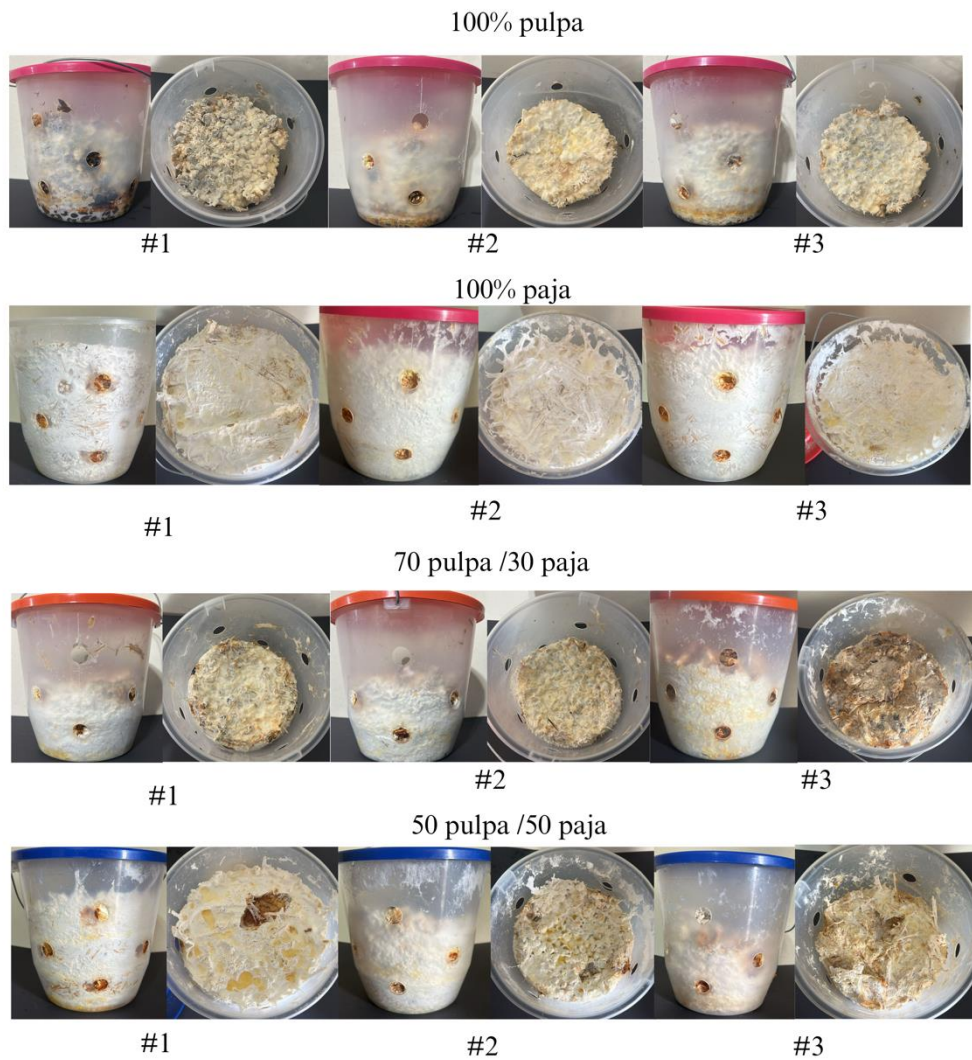


Cubeta 3 100%paja
Oleada 3



Nota. Elaboración propia.

Figura 50. Estado final del sustrato residual en las cubetas tras completar el ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus*, en sus diferentes combinaciones de sustrato



Nota. Elaboración propia.

Figura 51. Medición de la humedad del sustrato residual tras el ciclo productivo de *Pleurotus ostreatus*



Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 52. Prueba preliminar de prensado y secado del sustrato residual poscosecha de *Pleurotus ostreatus*

Bloque de sustrato poscosecha



Bloque poscosecha prensado



Bloque poscosecha prensado y secado



Nota. Elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, 2025.

Figura 53. Análisis fisicoquímico del sustrato de pulpa de café para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*



Orden: 32-901

Cliente: MARIA MONT,

Unidad Productiva: CHECHARROS I,

Fecha de Ingreso: 15/01/2025

Fecha de Ejecución: 23/01/2025 12:52:33

Fecha de Impresión: 23/01/2025

INFORME DE ANÁLISIS DE ABONO ORGANICO O-1

| No. | Identificación de la muestra | pH abonos | C/N | % *N | % P2O5 | % K2O | % CaO | % MgO | ppm Boro | % Azufre | ppm Cobre | ppm Hierro | ppm Manganeso | ppm Cinc | % C.O. | % Ceniza | % M.O. |
|------|------------------------------|-----------|-------|------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------|--------|----------|--------|
| 5212 | LOTE MUESTRA 1 PULPA DE CAFE | 6.30 | 27.17 | 1.84 | 0.41 | 5.31 | 0.85 | 0.19 | 33.91 | 0.13 | 12.82 | 25.68 | 9.91 | 5.55 | 50.00 | 10.00 | 90.00 |
| 5213 | LOTE MUESTRA 2 PULPA DE CAFE | 7.38 | 28.71 | 1.78 | 0.37 | 5.12 | 0.78 | 0.18 | 31.38 | 0.12 | 10.90 | 39.66 | 8.50 | 5.95 | 51.11 | 8.00 | 92.00 |
| 5214 | LOTE MUESTRA 3 PULPA DE CAFE | 6.65 | 28.56 | 1.77 | 0.35 | 4.79 | 0.82 | 0.18 | 31.86 | 0.12 | 10.92 | 37.88 | 8.47 | 5.84 | 50.55 | 9.00 | 91.00 |

1. Nitrógeno (N): determinación por método de Dumas
2. Fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) y boro (B): digestión ácida con microondas y lectura por medio de Espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente – ICP/OES.
3. Ceniza, Carbono orgánico (C.O.) y Materia orgánica (M.O.): método gravimétrico
4. pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo : Agua.

*** Análisis Acreditado Coguanor NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-087-18**

Resultados de informe

- *N = Nitrogeno
- *P₂O₅ = Fósforo
- *K₂O = Potasio
- *CaO = Calcio
- *MgO = Magnesio
- *C.O. = Carbono Orgánico
- *M.O. = Materia Orgánica
- *C/N = Relación Carbono-Nitrógeno



LAB_Pr108_FO1Versión 4

[Signature]
 Ing. Carlos Yucuté
 Especialista de Plantas y Esp.

1. Los resultados de este informe son validos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su impresión ORIGINAL.
2. Los resultados de este informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
3. El Laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este informe.
4. La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.
5. Todo documento fuera del servidor Control_Documentos(\\angua05) y de la carpeta \Publicados se considera una copia no controlada.

Nota. Anacafé, 2025.

Figura 54. Análisis fisicoquímico de tres muestras representativas del sustrato de paja para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*



Orden: 32-1011
 Cliente: MARIA MONT,
 Unidad Productiva: MARIA MONT

Fecha de Ingreso: 23/01/2025
 Fecha de Ejecución: 03/02/2025 11:13:24
 Fecha de Impresión: 03/02/2025

INFORME DE ANÁLISIS DE ABONO ORGANICO O-1

| No. | Identificación de la muestra | pH abonos | C/N | % *N | % P2O5 | % K2O | % CaO | % MgO | ppm Boro | % Azufre | ppm Cobre | ppm Hierro | ppm Manganeso | ppm Cinc | % C.O. | % Ceniza | % M.O. |
|------|------------------------------|-----------|-------|---------|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|--------------|---------------|------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 5616 | LOTE MUESTRA 1 | 8.49 | 58.82 | 0.85 | 0.14 | 2.33 | 0.33 | 0.14 | 3.54 | 0.10 | 9.37 | 401.80 | 98.10 | 15.41 | 50.00 | 10.00 | 90.00 |
| 5617 | LOTE MUESTRA 2 | 8.46 | 55.55 | 0.92 | 0.14 | 2.36 | 0.35 | 0.14 | 3.89 | 0.10 | 22.70 | 390.10 | 100.20 | 21.17 | 51.11 | 8.00 | 92.00 |
| 5618 | LOTE MUESTRA 3 | 8.47 | 25.51 | 0.98 | 0.15 | 2.57 | 0.42 | 0.16 | 4.25 | 0.11 | 9.77 | 383.80 | 111.80 | 16.48 | 25.00 | 55.00 | 45.00 |

1. Nitrógeno (N): determinación por método de Dumas
2. Fosforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) y boro (B): digestión ácida con microondas y lectura por medio de Espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente – ICP/OES.
3. Ceniza, Carbono orgánico (C.O.) y Materia orgánica (M.O.): método gravimétrico
4. pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo : Agua.

*** Análisis Acreditado Coguanor NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-087-18**

Resultados de informe

- *N = Nitrogeno
- *P₂O₅ = Fósforo
- *K₂O = Potasio
- *CaO = Calcio
- *MgO = Magnesio
- *C.O. = Carbono Orgánico
- *M.O. = Materia Orgánica
- *C/N = Relación Carbono-Nitrógeno



LAB_Pr108_F01 Versión 4

Ing Carlos Yucuté
 Especialista de Plantas y Esp.

1. Los resultados de este informe son validos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su impresión ORIGINAL.
2. Los resultados de este informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
3. El Laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este informe.
4. La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.
5. Todo documento fuera del servidor Control_Documentos(\\angua05) y de la carpeta \Publicados se considera una copia no controlada.

Nota. Anacafé, 2025.

Figura 55. Análisis fisicoquímico de una muestra del sustrato de paja para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*



Orden: 32-1207

Fecha de Ingreso: 05/02/2025

Ciente: MARIA MONT,

Fecha de Ejecución: 17/02/2025 02:25:38

Unidad Productiva: MARIA MONT

Fecha de Impresión: 18/02/2025

INFORME DE ANÁLISIS DE ABONO ORGANICO O-1

| No. | Identificación de la muestra | pH abonos | C/N | % | % | % | % | % | ppm | % | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | % |
|------|------------------------------|-----------|--------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|--------|-----------|-------|-------|--------|-------|
| | | | | *N | P2O5 | K2O | CaO | MgO | Boro | Azufre | Cobre | Hierro | Manganeso | Cinc | C.O. | Ceniza | M.O. |
| 6436 | LOTE MUESTRA 3 | 8.43 | 105.44 | 0.49 | 0.07 | 2.15 | 0.17 | 0.08 | 3.74 | 0.08 | 6.59 | 171.40 | 52.84 | 11.28 | 51.66 | 7.00 | 93.00 |

1. Nitrógeno (N): determinación por método de Dumas
2. Fosforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn) y boro (B): digestión ácida con microondas y lectura por medio de Espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente – ICP/OES.
3. Ceniza, Carbono orgánico (C.O.) y Materia orgánica (M.O.): método gravimétrico
4. pH: Determinación por potenciometría en relación 1:2.5 Suelo : Agua.

*** Análisis Acreditado Coguanor NTG/ISO/IEC 17025:2017 según OGA-LE-087-18**

Resultados de informe

- *N = Nitrogeno
- *P₂O₅ = Fósforo
- *K₂O = Potasio
- *CaO = Calcio
- *MgO = Magnesio
- *C.O. = Carbono Orgánico
- *M.O. = Materia Orgánica
- *C/N = Relación Carbono-Nitrógeno



LAB_Pr108_F01 Versión 4

[Handwritten Signature]
 Ing. Carlos Yucuté
 Especialista de Plantas y Esp.

1. Los resultados de este informe son validos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su impresión ORIGINAL.
2. Los resultados de este informe corresponden a muestras recibidas de acuerdo a los Criterios de Aceptación establecidos por Analab.
3. El Laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le de a este informe.
4. La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.
5. Todo documento fuera del servidor Control_Documentos(\\angua05) y de la carpeta \Publicados se considera una copia no controlada.

5a calle 0-50 zona 14 Guatemala, Guatemala C.A

E-mail: analab@anacafe.org

Teléfonos PBX: 2421-3700 ext: 1132 1133 1137

Nota. Anacafé, 2025.

XIII. Glosario

C/N (Relación carbono/nitrógeno): proporción entre el contenido de carbono y nitrógeno en el sustrato. influye en el equilibrio nutricional necesario para el crecimiento del micelio y la formación de cuerpos fructíferos.

Colonización: proceso en el que el micelio se expande y ocupa completamente el sustrato durante la etapa de incubación, previo a la fructificación.

Cuerpo fructífero: estructura reproductiva visible del hongo, comúnmente conocida como “seta”. es la parte comestible y cosechable del cultivo.

Desviación estándar: medida estadística que indica la dispersión de los datos respecto a la media, utilizada en este trabajo para evaluar la variabilidad de los parámetros analizados.

Enzima: molécula biológica que cataliza reacciones químicas. en el caso de los hongos, las enzimas extracelulares degradan los compuestos del sustrato, permitiendo la absorción de nutrientes.

Flush (oleada productiva): conjunto de cuerpos fructíferos que se desarrollan simultáneamente en un mismo periodo del ciclo productivo.

Fructificación: fase del cultivo en la que el micelio produce los cuerpos fructíferos. esta etapa requiere condiciones ambientales específicas, como mayor aireación y humedad.

Material lignocelulósico: biomasa vegetal compuesta principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. es la estructura básica de muchos residuos agrícolas.

Micelio: red de hifas que constituye la fase vegetativa del hongo. se desarrolla dentro del sustrato y es responsable de absorber los nutrientes necesarios para el crecimiento.

P. ostreatus: abreviación de *Pleurotus ostreatus*. Hongo comestible conocido como “ostra gris” por la forma y color de su sombrero, ampliamente cultivado por su valor nutricional y su capacidad para crecer sobre residuos agroindustriales.

Precocidad: tiempo que transcurre desde la finalización de la incubación hasta la aparición del primer flush. un valor bajo indica una rápida respuesta productiva del cultivo.

Primordio: etapa inicial del desarrollo del cuerpo fructífero, visible como una pequeña protuberancia blanca sobre la superficie del sustrato.

Prueba de Tukey: método estadístico de comparación múltiple empleado después del análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

Rendimiento biológico (RB): rendimiento del cultivo expresado como: (peso fresco de hongos / peso seco del sustrato). indicador clave de productividad.

Sustrato: material o mezcla de materiales que sirve como soporte y fuente de carbono y minerales para el desarrollo del micelio y la producción de cuerpos fructíferos.

Tasa de biodegradación: porcentaje del sustrato descompuesto durante el ciclo productivo. indica el rendimiento del hongo en el aprovechamiento del material.

Tasa de producción: medida de la cantidad de hongos producidos por unidad de tiempo. refleja el rendimiento temporal del cultivo y se calcula dividiendo el rendimiento biológico entre la duración total del ciclo productivo, expresándose en porcentaje por día (%/día).