



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

**Aprovechamiento de residuos de la industria
Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus* y
P. djamor en un cultivo a escala piloto**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

Luis Alejandro Castillo González

Director de Tesis

Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Agosto 2024



UASLP-Sistema de Bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis Digitales Restricciones de Uso DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Licencia de Creative Commons



Aprovechamiento de residuos de la industria Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* © 2024 por Castillo González Luis Alejandro se distribuye bajo una licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinDerivados 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Este proyecto se realizó en Laboratorio de Ingeniería en Biorreactores adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el periodo comprendido entre agosto del 2022 y agosto del 2024, bajo la dirección de la Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado y fue apoyado por fondos propios de la investigadora y en apoyo con el sector industrial con el M.C. Rubén Darío Cárdenas Duarte Gerente de Calidad de la Microcervecería “La Legendaria” de SLP.

El programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) del CONAHCYT, registro 000588. Número de la beca otorgada por CONAHCYT: 834321 con número de CVU 1234886.

Los datos del trabajo titulado Aprovechamiento de residuos de la industria Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* en un cultivo a escala piloto, se encuentran bajo el resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas instalación y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias de Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M15

Solicitud de Registro de Tesis Maestría

San Luis Potosí SLP a 11 / 04 / 2022

Comité Académico

En atención a: Dr. Alejandro Rocha Uribe

Por este conducto solicito a Usted se lleve a cabo el registro de tema de tesis de Maestría, el cual quedo definido de la siguiente manera: Aprovechamiento de residuos de la industria Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* en un cultivo a escala piloto que desarrollará el/la estudiante: IBP. Luis Alejandro Castillo González

bajo la dirección y/o Co-dirección de: Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado

Asimismo, le comunico que el proyecto en el cual trabajará el alumno involucrará el manejo de animales de experimentación, estudios con seres humanos o muestras derivadas de los mismos, el manejo y/o generación de organismos genéticamente modificados y requiere de aval de Comité de Ética e investigación de la FCQ.

(Complete la opción que aplique en su caso):

() Sí debido a que: _____

() No

(x) No Aplica

Sin otro particular, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

IBP. Luis Alejandro Castillo González

Estudiante

Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado

Directora de tesis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Aprovechamiento de residuos de la industria
Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus*
y *P. djamor* en un cultivo a escala piloto.

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

Luis Alejandro Castillo González

SINODALES:

Presidente: **Dra. Catalina Arenas Huertero**
Secretario: **Dr. Víctor Emanuel Balderas Hernández**
Vocal: **Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado**
Vocal: **M.C. Rubén Darío Cárdenas Duarte**

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Agosto 2024

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dra. Luz María Teresita Paz Maldonado, directora de la tesis. Adscrita al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dra. Catalina Arenas Huertero, asesora. Adscrita al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Víctor Emmanuel Balderas Hernández, asesor. Profesor invitado adscrito a la división de biología molecular del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

M.C. Rubén Darío Cárdenas Duarte, asesor. Profesor invitado gerente de calidad de la Microcervecería “La Legendaria”



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M5

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a 07/ 13 / 2024

En la ciudad de San Luis Potosí el día 07 del mes de Julio del año 2024 El que suscribe Luis Alejandro Castillo González Alumno(a) del programa de posgrado Maestría en Ciencias en Bioprocesos adscrito a Facultad de Ciencias Químicas manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Luz María Teresita Paz Maldonado y cede los derechos del trabajo titulado Aprovechamiento de residuos de la industria Cervecera utilizando los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* en un cultivo a escala piloto a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo sin el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección luiscastillo13199@gmail.com teresita.paz@uaslp.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

IBP. Luis Alejandro Castillo González

Agradecimientos

A lo largo de este proyecto ha habido un gran número de personas que me han alentado, apoyado, inspirado y motivado a hacer realidad este trabajo, no solo en el ámbito académico o profesional, sino también en el personal y espiritual. No únicamente en los buenos momentos, sino también en los malos, es por eso que este trabajo no es solo mío, sino de todos. No me queda más que agradecer desde lo más profundo de mi ser y con todo el amor que tengo a cada uno de ustedes por haber sido parte de esto.

A mi familia que siempre ha estado ahí para apoyarme, especialmente a mi madre Lizbeth González que me ha dado la fuerza y el coraje de seguir adelante incluso en los momentos más difíciles sabiendo que todo estará bien. Así mismo especialmente a mi abuelita Amada Guerrero por darme la sabiduría necesaria para afrontar cada reto que se ha presentado en el camino, así como la paciencia de escucharme cuando más lo he necesitado. A mis hermanos Carlos, Aliev y Karen Castillo por demostrarme la importancia del trabajo bien pensado y planeado. A mi tía Candy González por brindarme consejos de gran valor. A mi padre Antonio Castillo por apoyarme a su manera.

A mis asesores que han sido invaluableles en este proceso. A la Dra. Teresita Paz gracias por la confianza brindada en todo este tiempo, por confiar en mi y en mi “buen” criterio incluso cuando ni yo tenía la más mínima idea de lo que estaba haciendo, gracias por todo el apoyo que me brindó, las oportunidades invaluableles y por siempre estar ahí cuando más lo necesite. Al MC. Rubén Cárdenas por ser de las primeras personas en apoyar este proyecto no solo con materia prima, sino también con asesorías y con proyección del proyecto a un plano nacional e internacional. A los doctores Catalina Arenas y Víctor Balderas, gracias por sus asesorías y su saber invaluable que han sido de gran ayuda para que este proyecto siguiera un camino único, más completo y sólido.

A los doctores que si bien no han sido parte de mi comité tutorial han sido un gran apoyo con su conocimiento y consejos. Al Dr. Luis Martínez, gracias por todas sus enseñanzas y por ser un gran apoyo desde que este proyecto inicio en la licenciatura, gracias por siempre estar al pendiente de mi, por su amistad y por apoyarme siempre. A la Dra. Ana Pérez, gracias por sus consejos y las pláticas tan emotivas que me han llenado de conocimiento y diversión en los momentos incluso más estresantes. A la maestra Gloria Sosa por enseñarme y apoyarme con las técnicas correspondientes a los análisis proximales de los hongos, al doctor Samuel por su apoyo en la determinación de lípidos. Al Dr. Alejandro Uribe por el apoyo brindado a lo largo de mi desarrollo en el posgrado y por siempre tener en cuenta nuestro proyecto. A los doctores Avelina Franco, Claudia Escudero, Jorge Toro, María González, Marco Sánchez y todos los que me en algún momento me dieron clases y asesorías, gracias por transmitirme su conocimiento y buscar siempre mi mejor versión como estudiante.

A mis asesorados de proyecto terminal Guillermo Flores, Miriam Aranda, Polet Juárez y Esmeralda Moreno. Gracias por la confianza y permitirme ser parte de su formación académica, sin duda alguna me dejan muchísimas lecciones y aprendizajes que van más allá de lo profesional, además de amistades invaluable.

A las personas de servicio social Francisco Ipiña, Rubén Martínez, Óscar Vega, Mariana Castro, Camila Torres, Diana Suárez, Itzel Macias y Betsabé Sánchez cuyo apoyo a lo largo de los experimentos ha sido de vital importancia, gracias por su entrega, tiempo, dedicación, amistad y por siempre apoyar en cada momento. A Alondra Govea quien fue mi mano derecha en el último medio año, gracias por todo tu apoyo no solo con este proyecto, sino con todos los que se realizaron en este último periodo, por tus ganas de aprender, tu proactividad y amistad.

Por último, pero no menos importante a mis más grandes amigos Griselda Salazar, Óscar Sánchez, Leonardo Iruzto que han sido piezas clave en todo este proceso gracias por todo su apoyo y coraje para seguir con esto a pesar de lo complicado que se veía en muchas ocasiones, gracias por sus consejos y por creer en mi. Así mismo también a todos mis amigos durante el proceso Rogelio Franco, Thabata Hernández,

Francisco Flores, Francisco Valerio, Edwin Hernández, Luis Rodríguez, ing. Harold, Pamela García, Laura Torres, Cristina Martínez, Margarita Almendariz, Pablo González, Irma Villalpando, Alan Ayala, Diego López, Eduardo Alarcón, Jorge Tenorio, Enrique Muñoz, Jorge Monasterio, Diana Quezada, Daniela Ordaz, Arturo Almaguer, Jaqueline Sánchez, mis amigos de congresos y todos en general, muchas gracias por tantos momentos, por tantas risas, apoyo y por hacer esto más ameno.

A todas las personas mencionadas, y no mencionadas no me queda más que decirles
¡Muchas Gracias!

Resumen

En México la producción de cerveza en el 2022 fue de 14,100 millones de litros con un crecimiento del 5% anual. Durante este proceso el bagazo de malta es el principal residuo generado, se estima que en ese año se produjeron 2.82 millones de toneladas que no fueron aprovechadas en su totalidad, terminando en vertederos. En el presente trabajo el bagazo de malta proveniente de la Microcervecería “La Legendaria” se aprovechó como sustrato para el cultivo de los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor*, se determinó la mejor proporción de mezcla con óxido de calcio y rastrojo de maíz, además se estableció el prototipo de un invernadero para el cultivo a escala piloto, en donde se pudieron aprovechar en dos meses hasta 63.5 kg de sustrato, lo que resultó en la producción de 20 kg de hongo fresco. Además, se utilizó el Residuo Remanente de Hongo (RRH) para la obtención de extractos enzimáticos, demostrando su capacidad de decolorar el azul de bromofenol y el rojo Congo en un 91.75% y 90.68%, respectivamente. Por último, el RRH se compostó y se utilizó como suplemento en tierra para el cultivo de jitomate reduciendo su periodo de germinación en un 37.5%, incrementando el número de hojas reales en un 82%, el tamaño de raíz en un 300%, el tallo en un 94% y la concentración de clorofila A en un 37%. Lo anterior, demuestra que la estrategia de aprovechamiento de este residuo permite establecer la economía circular dentro de una cervecería local.

Palabras Clave: Bagazo de malta, *Pleurotus*, Economía circular, Aprovechamiento de residuos

Abstract

In 2022 the production of beer in Mexico was around 14,100 million of liters with an annual growth of 5%. In this process the Brewer's Spent Grain (BSG) is the principal residue generated with an amount around 2.82 million tons in that year that could not be totally used so it was discharged into landfills. In this work BSG obtained from Microcervería "La legendaria" was used as substrate for the culture of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus djamor*. The best relationship between BSG, calcium oxide and corn stubble were determined, also the design of a greenhouse for the culture in a pilot scale was done, in which, in a period of 2 months it was possible to process 63.5 kg of substrate that resulted in the obtention of 20 kg of fresh mushroom. Additionally, the Mushroom Spent Substrate (MSS) was used for the recovery of enzymatic extracts with the capacity of decoloring bromophenol blue and Congo red in 91.75% and 90.68%, respectively. Finally, the MSS was composted and used as a supplement of soil for the culture of tomato reducing its germination cycle in 37.5%, increasing the number of real leaves in 82%, the root size in 300%, the stem size in 94% and the concentration of chlorophyll A in 37%. All these results demonstrate that it is possible to make use of this residue, and this allow to stablish a circular economy in a local brewery.

Key words: Brewer's Spent Grain, *Pleurotus*, Circular economy, Usage of residues

Contenido

Índice de Figuras.....	21
Índice de tablas	25
Abreviaciones.....	27
I. Introducción.....	28
1.1 La situación actual de la cerveza	28
1.2 Ingredientes utilizados en el proceso de elaboración de la cerveza	28
1.3 El proceso de elaboración de cerveza y la generación de residuos.....	30
1.4 Disposición de los residuos generados	32
1.5 La economía circular y los ODS.....	34
II. Antecedentes	37
2.1 El potencial biotecnológico del bagazo de malta como nueva materia prima.	37
2.2 Características de los hongos del género <i>Pleurotus</i>	39
2.3 Parámetros de evaluación en el cultivo de hongos	42
2.4 Generación y aprovechamiento de un nuevo residuo	44
2.4.1 El mercado enzimático actual.....	44
2.4.2 La industria textil y la aplicación de enzimas	46
2.4.3 El uso de RRH como biofertilizante	49
III. Justificación.....	51
IV. Objetivos	52
4.1 Objetivo general	52
4.2 Objetivos específicos	52
V. Hipótesis	53

VI. Metodología	54
6.1 Análisis de materia prima	54
6.1.1 Prueba de compactación del bagazo.....	54
6.1.2 Preparación del extracto líquido	54
6.1.3 Análisis por sólidos suspendidos del exudado	54
6.1.4 Medición de pH.....	54
6.1.5 Análisis de azúcares reductores del exudado	54
6.1.6 Análisis de humedad del bagazo de malta	55
6.2 Cultivo de hongos	55
6.3 Diseño de invernadero a escala piloto	55
6.4 Obtención de parámetros de crecimiento de hongos	56
6.5 Análisis proximales de los cuerpos fructíferos	56
6.5.1 Determinación de humedad.....	56
6.5.2 Determinación de cenizas	56
6.5.3 Determinación de lípidos totales.....	56
6.5.4 Determinación de nitrógeno total	57
6.5.5 Determinación de fibra cruda.....	57
6.5.6 Determinación de contenido fenólico total	58
6.5.7 Determinación de carbohidratos totales	59
6.6 Recuperación y análisis de extractos enzimáticos	59
6.6.1 Recuperación de enzimas	59
6.6.2 Concentración de extractos enzimáticos	59
6.6.3 Análisis de concentración de proteínas	59
6.6.4 Estandarización de los extractos enzimáticos	59

6.6.5	Ensayos cuantitativos	60
6.6.5.1	Reacción enzimática.....	60
6.7	Decoloración de rojo Congo y azul de bromofenol.....	61
6.8	Crecimiento de jitomate con RRH como suplemento de suelo	62
6.8.1	Variación de RRH con tierra de cultivo en un sistema de hidroponía	62
6.8.2	Medición de parámetros de crecimiento	62
6.8.2.1	Evaluación de la planta madura.....	62
6.8.3	Crecimiento de jitomate en tierra suplementada con RRH y con composta a partir de RRH	63
6.8.3.1	Elaboración de la composta	63
6.8.3.2	Determinación de la humedad de la composta.....	63
6.8.3.3	Diseño experimental y tratamientos.....	63
6.8.3.4	Análisis microbiológico de los sustratos	64
6.8.3.5	Determinación del pH de los sustratos para el crecimiento de jitomate..	64
6.8.3.6	Evaluación de las variables de crecimiento de las plantas maduras	64
6.8.3.7	Determinación de la concentración de clorofila	64
6.8.3.8	Determinación de la humedad de las plantas	65
6.9	Análisis estadístico de los datos obtenidos.	65
VII.	Resultados y discusión.....	66
7.1	Análisis del bagazo y mezclas para el cultivo de hongos.....	66
7.1.1	El uso de rastrojo de maíz conlleva a un cambio en el índice de compactación	68
7.1.2	La concentración de sólidos suspendidos en las mezclas es similar a la del bagazo de malta, pero un 41% mayor a la de rastrojo del maíz.....	69

7.1.3	Las mezclas de bagazo de malta al 90% y 88% con rastrojo de maíz poseen un 52% más de azúcares reductores	70
7.1.4	El valor de pH entre 7 - 7.3 en la matriz permite el desarrollo de los hongos	72
7.1.5	La adición de rastrojo de maíz disminuye el porcentaje de humedad sin afectar el cultivo de los hongos	73
7.2	La recuperación y adaptación de espacios es una práctica viable para la instalación de prototipos de cultivo de hongos.....	74
7.2.1	El primer prototipo permitió ensayar diferentes proporciones de mezcla de bagazo de malta con rastrojo de maíz	74
7.2.2	Los parámetros de crecimiento de hongos son semejantes para casi todas las proporciones de bagazo de malta y rastrojo de maíz, pero son diferentes entre especies de hongos, cultivo control y escala piloto	82
7.2.2.1	La EB es diferente entre las especies de hongos y la escala, pero no entre las proporciones utilizadas a escala laboratorio, con excepción del control de <i>P. ostreatus</i>	83
7.2.2.2	El valor del PP entre las especies cultivadas a escala piloto es diferente	85
7.2.2.3	Existe diferencia en el valor de TP entre las especies cultivadas y la escala empleada, pero no entre muestras de la misma especie a escala laboratorio....	87
7.2.2.4	Hay diferencia en el rendimiento entre las especies cultivadas y el escalamiento.	89
7.2.2.5	Mejoramiento de los parámetros productivos de ambos hongos.....	91
7.3	Los análisis proximales indican que existe relación en algunos nutrientes como las proteínas, la fibra, los carbohidratos y el contenido fenólico total según la proporción de bagazo de malta con rastrojo de maíz.	92

7.3.1	La cantidad de humedad en los cuerpos fructíferos no varía en la mayoría de las proporciones empleadas	93
7.3.2	La cantidad de carbohidratos en los cuerpos fructíferos no varía con respecto a las proporciones utilizadas, pero es menor con respecto al valor reportado en la literatura.	95
7.3.3	La cantidad de fibra varia según la proporción de sustrato, y tipo de género cultivado, siendo <i>P. djamor</i> el que presenta la mayor cantidad	99
7.3.4	La cantidad de proteínas presentes en <i>P. djamor</i> es mayor que la cantidad reportada en la literatura para <i>P. ostreatus</i>	102
7.3.5	La cantidad de lípidos en los cuerpos fructíferos varía según la proporción de sustrato utilizado y se encuentran dentro del rango reportado en la literatura	104
7.3.6	La cantidad de cenizas presentes en los cuerpos fructíferos es menor en las proporciones de bagazo al 82%	107
7.3.7	El contenido fenólico total disminuye conforme se aumenta la cantidad de rastrojo de maíz en el sustrato.	109
7.3.8	El sustrato tiene un efecto directo en los nutrientes presentes en los cuerpos fructíferos para los hongos <i>P. ostreatus</i> y <i>P. djamor</i>	112
7.4	Los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH tienen actividad de amilasas, celulasas, lacasas y xilanasas	114
7.4.1	La concentración de proteínas no se ve afectada al momento de realizar el cambio de escala, presentando valores similares a los de la muestra control, pero dos veces por debajo a lo reportado en la literatura.	115
7.4.2	La actividad enzimática de amilasas varía según la proporción de bagazo utilizada además de que presenta cambios al momento de realizar el escalamiento	117

7.4.3	La actividad enzimática de las celulasas presenta una variación para las proporciones utilizadas a escala laboratorio, siendo mayor para el hongo <i>P. ostreatus</i> , además de tener un cambio de dicha actividad en ambos hongos al momento de realizar el escalamento.	118
7.4.4	La actividad de lacasas fue mayor a escala laboratorio, teniendo una reducción de hasta 50% a escala piloto.	120
7.4.5	La mayor actividad de xilanasas de <i>P. djamor</i> fue a escala laboratorio con respecto de <i>P. ostreatus</i> no se presenta diferencia en actividad enzimática entre la escala laboratorio y piloto.	121
7.4.6	El sustrato tiene un efecto en la actividad de las enzimas, así como la edad del RRH.	123
7.5	La decoloración de azul de bromofenol y rojo Congo es posible utilizando extractos enzimáticos recuperados del RRH con eficiencias del 90%	125
7.5.1	Los factores de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer de extracción y hongo afectan la remoción para ambos colorantes.	125
7.5.2	Las lacasas no son las únicas enzimas involucradas en el proceso de decoloración del azul de bromofenol y rojo Congo	136
7.5.3	Consideraciones para mejorar la capacidad de decoloración	138
7.6	El uso de RRH como suplemento de sustrato para el cultivo de jitomate en sistema de hidroponía promueve el crecimiento del tamaño de la raíz manteniendo constante la humedad de esta e incrementando el porcentaje de germinación....	138
7.6.1	El tamaño de raíz tiene un incremento del 84.81% cuando se adiciona RRH en una baja proporción.	140
7.6.2	El menor porcentaje de germinación se tuvo en la muestra CRRH, e incremento en las muestras BRRH y ARRH en comparación de CT	144

7.6.3	Los parámetros en el crecimiento del tomate presentan diferencias entre el CT con respecto a ARRH y CRRH en todos los casos pero no así con BRRH donde únicamente varía la medida del tallo.	145
7.6.4	El sustrato empleado afecta la medida del tallo, siendo CT la de mayor medida seguido por BRRH después por ARRH y finalmente por CRRH	147
7.6.5	Suplementar el sustrato de crecimiento con RRH en ambas concentraciones no afecta a la humedad de la planta y mantiene este valor dentro del óptimo para que esta crezca de forma adecuada	149
7.6.6	El número de hojas no varía entre la muestra CT y BRRH, pero si muestra una disminución con respecto a ARRH y CRRH	151
7.7	Cultivo en tierra del jitomate	152
7.7.1	La humedad de la composta es la óptima para su desarrollo	152
7.7.2	Microorganismos presentes en la composta	153
7.7.3	Parámetros de evaluación de crecimiento de las plantas en los diferentes sustratos	154
7.7.3.1	El pH se encuentra dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de jitomate	155
7.7.3.2	Los días de germinación se redujeron en las muestras CABRRH y CBRRH en un 37.5%	156
7.7.3.3	El porcentaje de germinación incrementa un 10% en la muestra CBRRH con respecto a CT, mientras que CARRH y CT presentan valores similares, así mismo CBRRH tiene un valor 57% mayor a comparación de CBRRH estéril ...	158
7.7.3.4	El sustrato CARRH es el que mayor media de hojas presenta con un incremento de hasta un 82% con respecto a la muestra CT.	159
7.7.3.5	El contenido de agua de las plantas es comparable con lo reportado en la literatura en las muestras CARRH y CBRRH	159

7.7.3.6 La composta con bajo RRH tuvo un incremento de 3.79 veces en el tamaño de raíz con respecto a CT, así mismo la presencia de microorganismos tienen un efecto benéfico en el crecimiento de la raíz.	160
7.7.3.7 El tamaño de tallo puede estar influenciado por la presencia de nutrientes en las muestras compostadas, teniendo un valor 62% por encima de CT, así mismo parece no haber relación entre este parámetro con respecto a la presencia de microorganismos.	161
7.7.3.8 La presencia de microorganismos promueve la concentración de clorofila A en un 65% y de la clorofila B en un 46%.....	161
7.8 El cumplimiento de los ODS y la implementación de la economía circular .	165
VIII. Conclusiones.....	166
IX. Perspectivas.....	170
X. Bibliografía	174
XI. Reporte de similitud	203
XII. Anexos	203
12.1 Preparación Reactivo DNS	203
12.2 Curvas de calibración.....	204
12.2.1 Curva de calibración DNS	204
12.2.2 Curva calibración proteínas por método de Bradford	205
12.2.3 Curva de calibración de ácido gálico	205
12.3 Retribución social durante el desarrollo del trabajo.....	206

Índice de Figuras

Fig. 1 Ingredientes utilizados en el proceso de elaboración de cerveza	30
Fig. 2 Proceso general de la elaboración de cerveza con los residuos generados en las distintas etapas de producción.	32
Fig. 3 Modelo económico Lineal y Circular (SafetyCulture, 2024).....	35
Fig. 4 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015 (United Nations, 2023).	36
Fig. 5 Bagazo de malta recuperado después del proceso de maceración dentro del proceso productivo de cerveza (Beerlabteam, 2020).	39
Fig. 6 Hongos <i>P. djamor</i> (a) y <i>P. ostreatus</i> (b) generados en el presente trabajo a escala laboratorio	40
Fig. 7 Residuo Remante de hongo (RRH) obtenido tras la cosecha de hongos	44
Fig. 8 Estructura del colorante rojo Congo (National Center for Biotechnology Information, 2024)	48
Fig. 9 Estructura del azul de bromofenol (National Center for Biotechnology Information, 2024)	49
Fig. 10 Prototipo de invernadero	55
Fig. 11 Diseño de bloques aleatorizado para la distribución de las bandejas de los experimentos realizados	64
Fig. 12 Índice de compactación de bagazo de malta, rastrojo de maíz y sustratos empleados para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i>	69
Fig. 13 Densidad (g/cm^3) medida por refractometría en el exudado de bagazo de malta, rastrojo de maíz y los sustratos utilizados para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i>	70
Fig. 14 Azúcares reductores presentes en el exudado de bagazo de malta, rastrojo de maíz y los sustratos utilizados para el cultivo de los hongos del género <i>Pleurotus</i> ...	72

Fig. 15 Variación de pH en el bagazo de malta sin adición de óxido de calcio, rastrojo de maíz y los sustratos con óxido de calcio utilizados para el cultivo de los hongos del género <i>Pleurotus</i> .	73
Fig. 16 Porcentaje de humedad en bagazo de malta, rastrojo de maíz (después de humidificarlo) y los sustratos utilizados para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i> .	74
Fig. 17 Espacio proporcionado para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i> , de lado izquierdo como fue proporcionado en un inicio y del derecho el primer prototipo implementado.	76
Fig. 18 Diagrama final del prototipo a escala piloto de invernadero para el cultivo de los hongos del género <i>Pleurotus</i> .	78
Fig. 19 Componentes del invernadero utilizados para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i> .	80
Fig. 20 Prototipo final de invernadero para el cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i> en dos vistas, desde la parte inferior (a) y desde la superior (b).	81
Fig. 21 Eficiencia biológica para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	85
Fig. 22 Periodo productivo para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	87
Fig. 23 Tasa productiva para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	89
Fig. 24 Rendimiento para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	90
Fig. 25 Porcentaje de humedad para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	95
Fig. 26 Carbohidratos (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	99
Fig. 27 Fibra (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.	102

Fig. 28 Proteínas (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto	104
Fig. 29 Lípidos (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto	106
Fig. 30 Cenizas (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto	109
Fig. 31 Contenido fenólico total (mg eq ác. gálico/ g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto	112
Fig. 32 Cantidad de proteínas (mg / g de RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato.....	116
Fig. 33 Actividad enzimática de amilasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato.....	118
Fig. 34 Actividad enzimática específica de celulasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato	120
Fig. 35 Actividad enzimática específica de lacasas (UI/L) para cada especie de hongo y proporción de sustrato	121
Fig. 36 Actividad enzimática específica de xilanasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato	123
Fig. 37 Muestras de colorante con enzima en tiempos de reacción de 0 y 120 horas para azul de bromofenol y rojo Congo.	125
Fig. 38 Porcentaje de decoloración de rojo Congo a 32°C y 4°C sin agitación para los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH de ambas especies de hongo	126
Fig. 39 Porcentaje de decoloración de azul de bromofenol a 32°C y 4°C sin agitación para los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH de ambas especies de hongo	127
Fig. 40 Espectro del extracto crudo enzimático.....	134
Fig. 41 Espectros de rojo Congo. De lado izquierdo al tiempo 0 y de lado derecho a las 96 horas de ensayo observándose remoción del colorante	135
Fig. 42 Espectros de azul de bromofenol, de lado izquierdo al tiempo 0 y de lado derecho a las 120 horas del ensayo observándose remoción del colorante	136

Fig. 43 Plantas de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos, Control Tierra (CT), Bajo RRH (BRRH), Alto RRH (ARRH) y Control RRH (CRRH). Panel a) 2 semanas de experimento, b) último día del experimento.....	139
Fig. 44 Tamaño de raíz (cm) para cada uno de los tratamientos en el crecimiento de jitomate en un sistema de hidroponía.....	140
Fig. 45 Tamaño de la raíz para cada uno de los sustratos a) BRRH, b) CT, c) ARRH, d) CRRH.....	142
Fig. 46 Humedad de las raíces en los diferentes sustratos utilizados en el crecimiento de jitomate en un sistema de hidroponía.....	143
Fig. 47 Porcentaje de germinación de las semillas en diferentes sustratos para el cultivo de jitomate.....	145
Fig. 48 Plantas de jitomate cultivadas en un sistema de hidroponía en diferentes sustratos. a) CT, b) BRRH, c) ARRH, d) CRRH.....	147
Fig. 49 Medida de tallo (cm) para cada una de las muestras de sustrato utilizadas para el cultivo de jitomate en hidroponía	149
Fig. 50 Humedad de las plantas del jitomate en los diferentes sustratos	150
Fig. 51 Número de hojas de las plantas de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos.....	151
Fig. 52 Composta realizada a partir de tierra y RRH, de lado izquierdo durante el proceso de compostaje y de lado derecho una vez terminado.....	153
Fig. 53 Estructura morfológica de <i>Trichoderma</i> spp. (izquierda) y <i>Aspergillus niger</i> (derecha) observados e identificados en microscopio óptico con un aumento de 400x	154
Fig. 54 Plántulas de jitomate en composta alta a los 35 días de crecimiento	164

Índice de tablas

Tabla 1 Composición química del bagazo de malta adaptado de: Nigam & Pandey, 2009; Mussatto, et al., 2006; Lynch, et al., 2016	37
Tabla 2 Composición nutrimental de los hongos <i>P. djamor</i> y <i>P. ostreatus</i> adaptado de: Salmones, 2017; Nieto, et al., 2019.	40
Tabla 3 Aminoácidos presentes en los cuerpos fructíferos de <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>djamor</i> adaptado de: Chirinang & Intarapichet, 2009; Roman, et al., 2020	41
Tabla 4 Composición mineral de los hongos <i>Pleurotus djamor</i> y <i>Pleurotus ostreatus</i> adaptado de Raman, et al., 2020; Elkanah, et al., 2022.....	42
Tabla 5 Características y aplicaciones de diferentes enzimas a nivel mundial adaptado de: Future Market Insides, 2022; Coherent Market Insights, 2023; Shraddha, et al., 2011; Arregui, et al., 2019; Persistence market research, 2023; Dataintel, 2022; Future Market Insights, 2023.	45
Tabla 6 Ventajas y desventajas de diferentes métodos fisicoquímicos empleados en la decoloración de colorantes textiles (Cortazar, et al., 2012).....	47
Tabla 7 Parámetros de los sustratos empleados para el crecimiento del hongo <i>Pleurotus djamor</i>	67
Tabla 8 Parámetros productivos de los hongos del género <i>Pleurotus</i> cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto	82
Tabla 9 Análisis proximales de los hongos de los hongos del género <i>Pleurotus</i> cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto	92
Tabla 10 Actividad enzimática de los extractos crudos enzimáticos recuperados del residuo remanente de los hongos del género <i>Pleurotus</i> cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto	114

Tabla 11 Porcentaje de decoloración de azul de bromofenol a diferentes condiciones de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer y especie de hongo	129
Tabla 12 Porcentaje de decoloración de rojo Congo a diferentes condiciones de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer y especie de hongo.....	131
Tabla 13 Porcentajes más altos de decoloración obtenidos en el presente trabajo	132
Tabla 14 Variables de la raíz y de la germinación de la planta de jitomate cultivado en diferentes muestras de sustrato en sistema de hidroponía	138
Tabla 15 Variables en el crecimiento de la planta de jitomate en cada uno de los sustratos utilizados en el sistema de hidroponía	146
Tabla 16 Parámetros de crecimiento del jitomate cultivado en los sustratos Control tierra (CT), tierra con RRH sin compostar en alta y baja concentración (ARRH y BRRH), tierra con RRH compostado (CARRH y CBRRH) y tierra con RRH compostado (CARRH y CBRRH) estériles	155
Tabla 17 Concentración de clorofila A y B de las plantas de jitomate cultivadas en cada uno de los sustratos.	163

Abreviaciones

EB: Eficiencia Biológica

Pfcf: Peso fresco cuerpos fructíferos

Pss: Peso seco sustrato

PP: Periodo Productivo

Dsm: Día de siembra del micelio

Ducf: Día última cosecha de fructificaciones

TP: Tasa Productiva

PfRRH: Peso fresco del residuo remanente de hongo

RRH: Residuo Remanente de Hongo

ARRH: Alto Residuo Remanente de Hongo

BRRH: Bajo Residuo Remanente de Hongo

CARRH: Composta Alto Residuo Remanente de Hongo

CBRRH: Composta Bajo Residuo Remanente de Hongo

I. Introducción

1.1 La situación actual de la cerveza

La cerveza es la quinta bebida más consumida en el mercado mundial, encontrándose por detrás del té caliente, agua embotellada, leche y bebidas carbonatadas (Fava, et al., 2011). En el año 2022 el consumo de esta bebida fue de aproximadamente 192.1 millones de kilolitros con un crecimiento de un 2.9% con respecto al año anterior, siendo el continente asiático el de mayor consumo mundial con un 33.9% del total seguido por el americano con un 30.4%, Europa con un 25.8% y el resto para los demás continentes (Kirin Brewery Company, 2023).

En cuanto a la producción de esta bebida alcohólica, en el año 2022 a nivel mundial se produjeron 189 millones de kilolitros con un crecimiento de 1.3% con respecto al año anterior. Los 5 países con mayor producción fueron China con 36.041 millones de kilolitros, seguido por Estados Unidos de América con 19.410 millones de kilolitros, Brasil con 14.743 millones de kilolitros, México con 14.100 millones de kilolitros y Alemania con 8.783 millones de kilolitros (BarthHass, 2023).

En nuestro país la industria cervecera se encuentra en el lugar 19 de las industrias manufactureras de un total de 288. Cifras del 2019 indican que antes de la pandemia del COVID – 19 el crecimiento de este mercado era del 6.7% anual (INEGI, 2020). En el 2022 la producción de esta bebida ascendió hasta los 141 millones de hectolitros (Martínez C. , 2023) lo que implica un crecimiento del 5% con respecto al año anterior en el mismo periodo de tiempo (El economista, 2022), representando el 1.5% del PIB nacional (Castro, 2022) y generando más de 700 mil empleos directos e indirectos entre los cuales se encuentran agricultores, malteros, cerveceros y vendedores (Juárez, 2021).

1.2 Ingredientes utilizados en el proceso de elaboración de la cerveza

La elaboración de la cerveza es un proceso que conlleva una serie de operaciones unitarias e ingredientes que se utilizan en las diferentes etapas de la elaboración.

Empezando por los ingredientes, el grano que se utiliza para la confección de esta bebida es la cebada malteada, conocida también como malta, de este se extraen los azúcares fermentables como glucosa y maltosa que serán fermentados posteriormente por las levaduras, así como los no fermentables en su mayoría dextrinas que confieren características como sabores tostados, acaramelados, ahumados, entre otros. El tipo de azúcares que se extraigan de la malta dependerán de diferentes factores como el grado de tostado, la temperatura de maceración, entre otros factores (Palmer, 2006).

El lúpulo es otro de los principales ingredientes utilizados. Este se obtiene a partir de las flores sin fecundar de la planta femenina *Humulus lupulus*, que tras su proceso de maduración son recolectadas, secadas, molidas y peletizadas (Srecec, et al., 2009). Si bien, su composición química es algo compleja, existen 3 grupos que son de alta importancia al momento de elaborar cerveza debido a sus características:

- Resinas, constituidas por alfa y beta ácidos que le confiere a la bebida un toque amargo según la cantidad que contenga.
- Aceites esenciales, en este grupo entran más de 300 compuestos volátiles que imparten diferentes características aromáticas a la bebida como lo pueden ser cítricos, terrosos, florales, vegetales, herbales, entre otros.
- Polifenoles, conformados principalmente por taninos, este tipo de moléculas no se busca que queden en la bebida final debido a su sabor, sin embargo, tienen la característica de ser un buen agente antimicrobiano (González, 2017).

La levadura que se utiliza para el proceso de fermentación generalmente es *Saccharomyces cerevisiae* para cervezas de tipo ale y *Saccharomyces pastorianus* para tipo lager, la diferencia es la temperatura de fermentación, siendo de 16 – 25 °C y 5 – 13 °C respectivamente (SNBC, 2021). Este hongo unicelular se caracteriza por tener dos tipos de metabolismo, uno aerobio en donde se promueve la generación de biomasa y otro anaerobio en donde se producen alcoholes (principalmente etanol) y ésteres (que confieren una amplia gama de aromas y sabores), todo esto a partir de

los azúcares fermentables y nutrientes recuperados de la malta (White & Zainasheff, 2010).

El agua es el principal ingrediente utilizado durante la elaboración de la cerveza abarcando hasta un 97% del total de la bebida, que según sus características tendrá una influencia directa sobre el sabor del producto terminado, dentro de estas destacan los iones presentes en la matriz como calcio, magnesio, sodio, azufre, cloro y bicarbonato (Precision Fermentation, 2022). Calcio y magnesio funcionan como cofactores para la enzima α -amilasa, sin embargo, si alguno de estos iones se encuentra en concentraciones muy elevadas a lo requerido por la levadura puede llevar a la inactivación de sus enzimas y su posterior muerte, así como también producir efectos nocivos en el consumidor (Briggs, et al., 2004); (Punčochářová, et al., 2019). En la Fig. 1 se muestran los ingredientes anteriormente mencionados.



Fig. 1 Ingredientes utilizados en el proceso de elaboración de cerveza

1.3 El proceso de elaboración de cerveza y la generación de residuos

En la Fig. 2 se muestra el proceso de elaboración de la cerveza el cual inicia con la molienda del grano, esto se hace con el objetivo de exponer el almidón del endospermo y sus enzimas. Cuando el grano no se muele de manera correcta trae consigo diferentes problemas como poca conversión de azúcares cuando el tamaño es muy grande o extracción de compuestos no deseados y harinas cuando es muy pequeño (Pereira & Rocha, 2018).

Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de maceración al agregar agua en un rango de temperatura de 62 – 67 °C a una relación 3:1 o 4:1 litros por kg de malta molida, el proceso se realiza en 1 hora donde las enzimas α y β amilasa realizan reacciones de hidrólisis de la cadena de almidón en dextrinas-maltosa y glucosa, respectivamente. Dentro de este proceso también se activan proteasas que degradan las proteínas presentes en el grano, convirtiéndolas a aminoácidos y dando como resultado el mosto cervecero rico en azúcares, aminoácidos y elementos traza para el crecimiento de las levaduras (Kenechukwu, 2019).

Una vez terminado el tiempo de maceración se hace una recirculación con el mosto para clarificar el líquido y después se traslada al hervidor, posteriormente se hace el lavado de grano o “sparge” con agua a una temperatura de 76 – 77 °C con el fin de recuperar la mayor cantidad de azúcares que hayan quedado en el grano (González, 2017). Una vez terminado este tratamiento el mosto sigue su procesamiento, en este punto se genera el primer residuo del proceso cervecero, el bagazo de malta, cuya tasa de generación es de aproximadamente 200 gramos por cada litro (Aliyu & Bala, 2011) con una demanda bioquímica de oxígeno de 16,000 mg/L (Devolli, et al., 2018).

El proceso continúa con el hervido que se lleva a cabo en una hora. En este punto se agregan los lúpulos que le conferirán a la bebida su característico sabor amargo, así como diferentes toques frutales, herbales, aterrados, resinosos, entre otros. Una vez terminado el tiempo se estima que aproximadamente el 15% del lúpulo utilizado se isomeriza y se une a la matriz de la cerveza, por lo cual después se realiza el Whirlpool con el fin de asentar la mayor cantidad de lúpulo remanente y el mosto lupulado se pasa al fermentador (Palmer, 2006). El residuo remanente tras el vaciado se conoce como residuo de lúpulo que se genera en la cantidad de 1.5 a 4.5 gramos por litro dependiendo del estilo de cerveza producido (Nigam & Pandey, 2009), teniendo una demanda bioquímica de oxígeno de 110,000 mg/L (Devolli, et al., 2018).

Una vez que el mosto lupulado se encuentra en el fermentador se hace la adición de la levadura y se da lugar al proceso de fermentación por un periodo de tiempo aproximado de dos semanas según sean las condiciones del proceso (González,

2017). Pasado el periodo de tiempo, del fermentador se descarta la levadura ya sea de la parte inferior o superior según sea el tipo de cerveza manufacturada (ale o lager, respectivamente), generando un aproximado entre 15 y 18 gramos de residuo por litro de cerveza fabricado (Jaeger, et al., 2020) con una demanda bioquímica de oxígeno de 140,000 mg/L (Devolli, et al., 2018).

La cerveza finalmente es carbonatada y pasa a su envase final, ya sea botellas de vidrio o bien, barriles (Palmer, 2006).



Fig. 2 Proceso general de la elaboración de cerveza con los residuos generados en las distintas etapas de producción.

1.4 Disposición de los residuos generados.

Considerando la cantidad de cerveza producida en el año 2022 se puede calcular un aproximado de los residuos generados en ese mismo periodo de tiempo, teniendo como resultado 2.82 millones de toneladas de bagazo de malta, entre 21,150 y 63,450 toneladas de lúpulo y 211,500 toneladas de residuo de levadura.

Cada uno de estos residuos se puede emplear para diferentes usos como el alimento de ganado, cultivo de microorganismos, obtención de productos de interés como ácido láctico, fenoles, flavonoides, fibra, suplementos alimenticios, entre otros. Sin embargo, el principal uso sigue siendo como alimento para ganado, limitando así su aprovechamiento cuando no existe una industria ganadera o animales rumiantes cerca de la zona en donde se está produciendo la cerveza, por lo que muchas veces estos residuos terminan en campos, vertederos, quemados o en el caso de los residuos de lúpulo y levadura se desechan al drenaje esperando a que lleguen a una planta tratadora de aguas residuales en donde se les dé un correcto tratamiento (Karlovic, et al., 2020).

En San Luis Potosí existen al menos 60 marcas de cerveza artesanal (Mora, 2022), siendo las de mayor renombre 7 Barrios, La Legendaria, Tangamanga Brewing, Gusto Culposo, Brewtal Bros y Wasumara (Zacarías, 2022). Si bien, algunas de estas cervecerías tienen acceso a ganaderos para disponer su bagazo de malta, la realidad es que la mayoría no tiene esta posibilidad y terminan desechándolo en vertederos o al basurero municipal.

Sin embargo, actualmente existe una problemática en diferentes estados de la república en donde los vertederos ya no cuentan con la capacidad necesaria para almacenar más residuos, razón por la cual han comenzado a surgir vertederos clandestinos cerca de zonas pobladas en estados como San Luis Potosí (El Sol de San Luis, 2022); (El Universal San Luis Potosí, 2018), Querétaro (Segura, 2022), Ciudad de México (Navarro, 2020), Jalisco (El Informador, 2019), Nuevo León (Campos C. , 2022) entre otros. Trayendo consigo también diferentes problemáticas de salud para las personas que viven cerca de la zona como problemas gastrointestinales, además de la proliferación de plagas animales que son focos de infección para la población (El Sol de San Luis, 2022).

1.5 La economía circular y los ODS.

Históricamente el modelo económico que ha predominado en el mundo desde el siglo XX ha demostrado ser sumamente exitoso en generar bienes de valor agregado en países industrializados, sin embargo, este modelo promueve una desigualdad en diferentes regiones del mundo. En donde se ha promovido el valor de la labor humana sobre el de los recursos naturales, haciendo así que los países desarrollados incrementen su brecha económica sobre los productores de materias primas, y como consecuencia de ello se ha dejado de lado la parte ambiental, así como el interés de reciclar, reutilizar y reincorporar los residuos a la cadena productiva. Datos europeos indican que al menos 21 millones de toneladas de material utilizados en la producción de bienes no terminan en el producto final y se pierden en diferentes partes del proceso o como residuo (Sariatli, 2017).

La economía lineal es el modelo económico empleado actualmente en la sociedad, esta se basa en el modelo de tomar – producir – disponer, en esta se prioriza la producción de bienes sin tener en consideración las afectaciones que surgirán por los residuos generados o con el bien cuando este pase a ser basura. Por ello, los residuos se han convertido en un problema a nivel mundial, no solo por su impacto medioambiental, sino también por el costo que conlleva el manejo de los desechos (Purwanto & Prasetyo, 2021).

Por esta razón, es necesario adoptar nuevas estrategias y modelos en los que se busquen atacar estas problemáticas, en donde uno de los principales es la economía circular. Este modelo económico se basa en el concepto de las 4R's en los procesos de consumo y producción, al reducir el máximo el consumo de materia prima virgen, así como el desperdicio de esta. De igual manera este modelo busca aprovechar los residuos generados en los procesos de manufactura, al utilizarlos como nuevas materias primas para obtener productos de valor agregado. De esta manera se busca promover no solo un desarrollo sustentable en la sociedad, sino también social y económico (Garcés, et al., 2019). En la fig. 3 se muestra el diagrama de la economía

lineal y la economía circular haciendo énfasis en la importancia de esta última que se basa en el reciclaje y aprovechamiento de recursos.

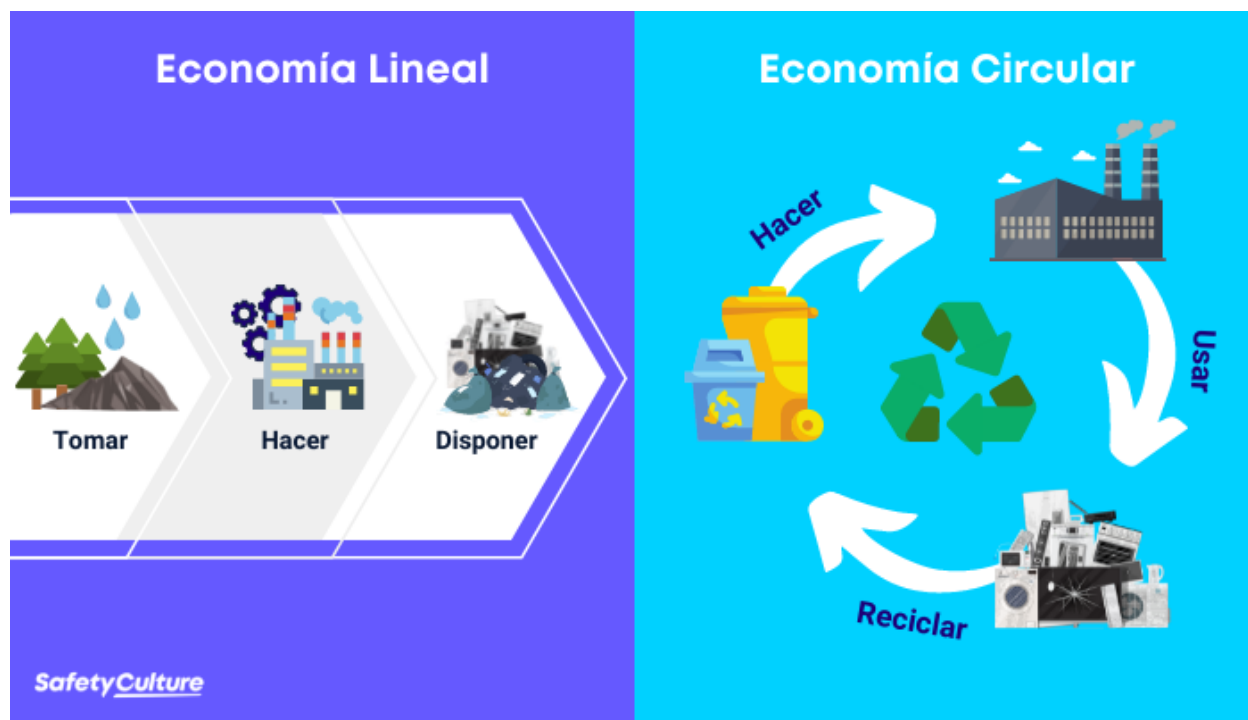


Fig. 3 Modelo económico Lineal y Circular (SafetyCulture, 2024).

El adoptar este tipo de modelo económico no solo se obtiene el beneficio de darle un uso a los residuos generados en los procesos de manufactura, también se pueden alcanzar las metas establecidas por la ONU en el año 2015 con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (mostrados en la Fig. 4) como Fin de la pobreza, Hambre cero, Agua limpia y saneamiento, Industria, Innovación e infraestructura, Ciudades y comunidades sostenibles, Producción y consumos responsables entre muchos otros (United Nations, 2023).



Fig. 4 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015 (United Nations, 2023).

Actualmente en países en vías de desarrollo se aprovechan únicamente el 17% de los residuos orgánicos generados en diferentes procesos productivos (Romero, 2022), esto es algo preocupante debido a la gran cantidad de desechos que se disponen en los vertederos, y más cuando estos son clandestinos afectando así a la población, es por eso que es necesario comenzar a adoptar modelos como la economía circular en donde se valoricen los residuos como materias primas en proyectos con impacto social, económico y ecológico. Lo anterior se puede lograr de manera más fácil cuando se colabora de manera directa con el sector productivo.

II. Antecedentes

2.1 El potencial biotecnológico del bagazo de malta como nueva materia prima.

Dentro de las principales características del bagazo de malta (Fig. 5) se encuentra su alto contenido lignocelulósico (Mussatto, et al. 2006), sin embargo, su composición química resulta de gran interés para poder ser aprovechado en diferentes aplicaciones, esta se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición química del bagazo de malta adaptado de: Nigam & Pandey, 2009; Mussatto, et al., 2006; Lynch, et al., 2016

Compuesto	Proporción total en la matriz	Componentes	Porcentaje de la proporción total
Material lignocelulósico	40 – 70%	Hemicelulosa	19.2 - 40%
		Celulosa	12 - 33%
		Lignina	11.9 – 27.8%
Proteínas	19 – 30%	Hordeínas, glutelinas, globulinas, histidina	26%
		Ácido glutámico	17%
		Lisina	14%
		Aminoácidos de leucina	14%
Lípidos	3 – 13%	Ceras, resinas, gomas, aceites esenciales	No especifica
Cenizas	2 – 5%	No aplica	No aplica
			Concentración (mg/kg)
Minerales	2 – 5%	Fósforo	4,600 – 6,000
		Calcio	2,200 – 3,600

		Magnesio	1,900 – 2,400
		Potasio	600 – 2,580
		Sodio	137 – 309
		Hierro	100 – 193
		Cobre	11.4 – 18
			Concentración (mg/L)
Vitaminas y fenoles	0.7 – 2%	Colina	1,800
		Vitamina B3	44
		Vitamina B5	8.5

Como se mencionó anteriormente este residuo se utiliza principalmente para el alimento de animales rumiantes demostrando un incremento en la cantidad de proteínas de su carne, así como en la calidad de su leche, se ha comprobado también que funciona para la alimentación de peces incrementando hasta en un 30% su masa corporal (Mussatto, et al., 2006).

Sin embargo, sus características químicas hacen que este residuo sea de gran interés para ser utilizado en diferentes aplicaciones: recuperación de arabinosa, xilosa, producción de bioetanol (Bado, et al., 2021), producción de biogás (Carlini, et al., 2021), producción de ácido láctico, recuperación de enzimas, cultivo de microorganismos y hongos (Karlovic, et al., 2020). En el caso de su uso como sustrato para el cultivo de organismos, algunos de los géneros que se han cultivado con éxito han sido *Pleurotus*, *Agrocybe*, *Letinus*, *Aspergillus* y *Trichoderma* (Nigam & Pandey, 2009).

En cuanto a la producción y recuperación de enzimas, esto se ha reportado con éxito utilizando hongos, estos tienen la ventaja de secretarlas al medio extracelular evitando así un proceso de lisis celular, además de que actualmente es posible escalar este tipo de procesos a nivel industrial para poder satisfacer diferentes campos y aplicaciones (Machado, et al., 2019).



Fig. 5 Bagazo de malta recuperado después del proceso de maceración dentro del proceso productivo de cerveza (Beerlabteam, 2020).

2.2 Características de los hongos del género *Pleurotus*.

Como se describió anteriormente el bagazo de malta se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Muchos microorganismos presentan el sistema enzimático necesario para poder degradar y aprovechar los primeros dos como fuente de carbono, sin embargo, para la lignina solo hay un número limitado de organismos capaces de degradarla y aprovecharla como fuente de carbono, entre ellos los hongos de pudrición blanca, la mayoría pertenecen al grupo de los *basidiomicetes*. Los hongos del género *Pleurotus* se caracterizan por tener las enzimas extracelulares necesarias para degradar este tipo de residuos mediante celulasas, hemicelulasas, lacasas, peroxidases, entre otras (Rodríguez, et al., 2018).

Este tipo de hongos se caracterizan por ser comestibles, su consumo ha ido incrementando debido a su valor nutricional, propiedades organolépticas, valor culinario e ingredientes bioactivos. Gracias a estas propiedades se ha comenzado a implementar como sustituto de carne en dietas humanas (Familoni, et al., 2018). Su cultivo se realiza en fermentación en fase sólida en donde se caracterizan principalmente las etapas de crecimiento micelial y producción de carpóforos (Rodríguez, et al., 2018). Entre los residuos agroindustriales que se utilizan con más frecuencia para su cultivo se encuentran aserrín, paja, rastrojo, residuo de café, algodón, papel, bagazo de caña de azúcar y agave (Stamets, 1993).

Dentro de los hongos del género *Pleurotus* se encuentran las especies *Pleurotus djamor* y *Pleurotus ostreatus*, ambos tienen la característica de poseer compuestos bioactivos con propiedades anticancerígenas, antibióticas, antioxidantes, antiparasitarias, antiinflamatorias, antidiabéticas, antilipémicos y hepatoprotectoras, además de tener la capacidad de producir biomasa con mayor contenido de nitrógeno que el sustrato en el que están creciendo (Salmones , 2017). En la Fig. 6 se muestran los hongos *P. djamor* y *P. ostreatus* cultivados con éxito en bagazo de malta a escala laboratorio

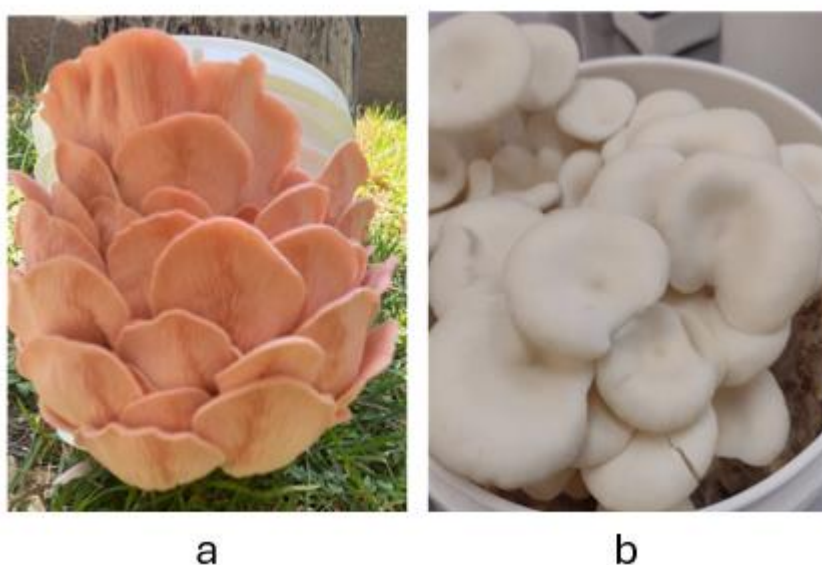


Fig. 6 Hongos *P. djamor* (a) y *P. ostreatus* (b) generados en el presente trabajo a escala laboratorio

En la Tabla 2 se muestran las características nutrimentales de cada uno de estos hongos en peso seco (con una humedad entre 79.5 – 90 %):

Tabla 2 Composición nutrimental de los hongos *P. djamor* y *P. ostreatus* adaptado de: Salmones, 2017; Nieto, et al., 2019.

	<i>Pleurotus djamor</i>	<i>Pleurotus ostreatus</i>
Carbohidratos	32.7 – 48.3	37 – 48
Proteínas	20.7 – 28	17 – 42
Grasas	0.11 – 2.09	0.5 – 5

Fibra	9.1 – 22.4	24 – 31
-------	------------	---------

En cuanto a la composición de aminoácidos (aa) se tiene reportado que ambos hongos presentan tanto aa esenciales y no esenciales requeridos para una correcta dieta humana, estos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Aminoácidos presentes en los cuerpos fructíferos de Pleurotus ostreatus y djamor adaptado de: Chirinang & Intarapichet, 2009; Roman, et al., 2020

Aminoácido	<i>Pleurotus djamor</i> (g/100 g de proteína seca)	<i>Pleurotus ostreatus</i> (mg/g peso húmedo)
Alanina	5.65 ± 0.005	1.90 ± 0.015
Arginina	9.94 ± 0.005	3.26 ± 0.015
Ácido aspártico	7.06 ± 0.006	2.04 ± 0.020
Ácido glutámico	9.61 ± 0.005	5.01 ± 0.015
Glicina	15.98 ± 0.01	0.83 ± 0.019
Histidina*	3.21 ± 0.006	0.55 ± 0.012
Isoleucina*	1.39 ± 0.005	0.62 ± 0.007
Leucina*	3.66 ± 0.002	1.13 ± 0.008
Lisina*	4.02 ± 0.015	0.71 ± 0.007
Metionina*	7.65 ± 0.01	0.28 ± 0.006
Fenilalanina*	3.96 ± 0.0006	0.73 ± 0.006
Prolina	1.54 ± 0.01	0.29 ± 0.008
Serina	8.86 ± 0.005	1.09 ± 0.009
Treonina*	5.29 ± 0.01	1.01 ± 0.001
Triptófano*	1.32 ± 0.01	0.15 ± 0.001
Tirosina	7.11 ± 0.01	0.57 ± 0.008
Valina*	4.30 ± 0.01	0.91 ± 0.010

* Aminoácido esencial

Además, este tipo de hongos son de interés para algunas dietas por su composición mineral, que se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4 Composición mineral de los hongos Pleurotus djamor y Pleurotus ostreatus adaptado de Raman, et al., 2020; Elkanah, et al., 2022

Mineral	<i>Pleurotus djamor</i> (mg / kg)	<i>Pleurotus ostreatus</i> (mg/L)
Hierro	17.32 ± 0.03	3.35 ± 1.68
Potasio	2,218 ± 0.58	7.66 ± 1.11
Zinc	1.21 ± 0.00	2.81 ± 0.12
Calcio	49.67 ± 0.04	4.46 ± 1.41
Magnesio	167.37 ± 0.55	3.63 ± 0.98
Sodio	67.12 ± 0.02	0.13 ± 0.04
Fósforo	503.1 ± 0.1	No detectado

2.3 Parámetros de evaluación en el cultivo de hongos

Dentro del proceso de cultivo de hongos existen diferentes parámetros que se utilizan para evaluar la eficacia del sistema productivo que se está proponiendo. Estos parámetros son:

- Eficiencia Biológica (EB): expresa el grado de bioconversión de energía a partir del sustrato utilizado para el hongo durante su desarrollo, este se representa como la relación que existe entre el peso fresco de los cuerpos fructíferos producidos por el hongo y el peso seco del sustrato empleado, a partir de la siguiente ecuación (Ardón, 2004):

$$EB = \frac{P_{fcf}}{P_{ss}} * 100 \quad (1)$$

En donde:

P_{fcf}: Peso fresco cuerpos fructíferos

Pss: Peso seco sustrato

- Periodo productivo (PP): Se define como el tiempo transcurrido desde la siembra del micelio en el sustrato hasta que se toma la última cosecha de cuerpos fructíferos con la ecuación:

$$PP = Dsm - Ducf \quad (2)$$

Donde:

Dsm: Día de siembra del micelio

Ducf: Día última cosecha de fructificaciones

- Tasa Productiva (TP): Se obtiene al dividir la Eficiencia biológica entre el periodo productivo con la ecuación (Rodríguez, et al., 2018):

$$TP = \frac{EB}{PP} \quad (3)$$

- Rendimiento: Relación presentada en porcentaje entre la cantidad de un producto y los factores que se utilizan para su obtención, en este caso es un parámetro de productividad y se define como la relación entre el peso húmedo de las fructificaciones y el peso final del sustrato húmedo con la ecuación (Castillo & Martínez, 2022):

$$R = \frac{Pfcf}{PfRRH} * 100 \quad (4)$$

Donde:

PfRRH: Peso fresco del residuo remanente de hongo

La evaluación de estos parámetros es importante al momento de tomar decisiones correspondientes al escalado del proceso, así como a las pertinentes al uso de un sustrato de una única fuente, o bien combinado con otro tipo de materiales para que estos valores incrementen.

2.4 Generación y aprovechamiento de un nuevo residuo

Después de la cosecha del cuerpo fructífero de los hongos se genera un nuevo residuo, conocido como Residuo Remanente de Hongo (RRH) mostrado en la Fig. 7, aproximadamente por cada kilogramo de cuerpo fructífero generado se producen 5 kg de RRH (Kwiatkowski & Harasim, 2021) este tipo de residuos cuando es desechado de manera incorrecta en vertederos conlleva a problemas como daño ecológico, contribución al calentamiento global por emisiones de dióxido de carbono y metano, así como a la contaminación de agua y acumulación de metales en el suelo (Vats, et al., 2022).

Sin embargo, este residuo puede ser aprovechado nuevamente dentro del marco de la economía circular. Dentro de su composición se encuentra micelio, enzimas extracelulares y sustrato lignocelulósico no utilizado. Este residuo se ha aprovechado para la producción de biogás, recuperación de enzimas como amilasas, celulasas, xilanasas, lacasas entre otras más, producción de biofertilizante, degradación de pentaclorofenol y como suplemento de alimentos para animales (Lim, et al., 2013).



Fig. 7 Residuo Remante de hongo (RRH) obtenido tras la cosecha de hongos

2.4.1 El mercado enzimático actual

Las enzimas tienen diversas aplicaciones, en la industria biotecnológica, textil, de alimentos, papelera, detergentes, entre otras. En la Tabla 5 se muestran las enzimas

con su respectivo sustrato, valor agregado en el mercado, crecimiento, predicción a futuro, grupos de enzimas que lo conforman e industria en donde se aplican.

Tabla 5 Características y aplicaciones de diferentes enzimas a nivel mundial adaptado de: Future Market Insides, 2022; Coherent Market Insights, 2023; Shraddha, et al., 2011; Arregui, et al., 2019; Persistence market research, 2023; Dataintel, 2022; Future Market Insights, 2023.

	Celulasas	Lacasas	Amilasas	Xilanasas
Sustrato	Celulosa	Lignina, compuestos fenólicos	Almidón	Xilano / hemicelulosa
Valor del mercado mundial 2022.	USD \$1,621 millones	USD \$3 millones	USD \$1,357.2 millones	728.7 millones
Crecimiento anual compuesto calculado (año)	6.9% (2032)	4.3 % (2028)	5.1 % (2030)	5.9 % (2030)
Predicción del valor del mercado (año)	USD \$3153.1 millones (2032)	USD \$4 millones (2028)	USD \$1,772.3 millones (2030)	1292.8 millones (2030)
Grupos de enzimas	Endo-(1,4)- β - glucanasa Exo-(1,4)- β - glucanasa β glicosidasas	T1 T2 T3	α amilasas β amilasas γ amilasas	Endo – β – xilanasas. β – xilosidasas
Industria de aplicación	Textil, papelería, alimenticia,	Textil, alimenticia,	Alimenticia, bebidas,	Biocombustibles, farmacéutica,

	bebidas, agricultura, biocombustibles, entre otras	farmacéutica, biorremediación, nanotecnología, entre otras	detergentes, textil, papelera, bioenergía, entre otras	papelera, alimenticia, bebidas, entre otras
--	---	---	--	--

2.4.2 La industria textil y la aplicación de enzimas

Actualmente la industria textil utiliza un aproximado de 700,000 toneladas de colorantes para la producción de 30 millones de toneladas de ropa, esto ha conllevado a una producción excesiva de efluentes contaminantes que causan una serie de problemas graves al ambiente, si bien, este tipo de efluentes se pueden procesar mediante tratamientos químicos o físicos, la realidad es que estos son lentos, costosos y generan nuevos lodos contaminantes, sin embargo, hoy en día existe una nueva alternativa para el tratamiento mediante procesamientos biológicos, que además de ser económicos son amigables con el medio ambiente (Rhadika, et al., 2014).

Los colorantes sintéticos del grupo azo son los que se emplean con mayor frecuencia en la industria textil, estos se caracterizan por tener un grupo funcional representados mediante el enlace $-N=N-$, se estima que la concentración de estos en aguas residuales de las empresas textiles varía entre 100 a 500 mg/L además de ser poco biodegradables y persistentes (Martínez, et al., 2018).

En la Tabla 6 se muestran algunas de las alternativas fisicoquímicas con sus respectivas ventajas y desventajas, sin embargo, muchas de estas tecnologías aunque están disponibles en el mercado son altamente específicas, con costos elevados y no aplican para una amplia variedad de colorantes además de que no resuelven el problema de la decoloración.

Tabla 6 Ventajas y desventajas de diferentes métodos fisicoquímicos empleados en la decoloración de colorantes textiles (Cortazar., et al., 2012).

Tipo de método	Método	Ventajas	Desventajas
Físico	Adsorción	Remoción eficiente de varios colorantes usando sílica y materiales celulósicos.	Materiales específicos de alto costo y pérdidas de estos en la regeneración.
	Filtración por membrana	Útil para remover colorantes en bajas concentraciones.	Altos costos.
	Intercambio iónico	Muy efectivo para remover colorantes catiónicos y aniónicos.	Utiliza solventes orgánicos de elevado precio comercial.
Químico	Electroquímico	Eficiente remoción de colorantes y degradación de contaminantes sin generar subproductos tóxicos o lodos.	Alto uso de electricidad y costo elevado de la misma.
	Oxidación	Es uno de los métodos más usados y eficientes, utiliza químicos como el reactivo de Fenton, hipoclorito de sodio u ozono.	El reactivo de Fenton conlleva a la formación de lodos, el uso de hipoclorito de sodio genera subproductos tóxicos y cancerígenos.
	Fotoquímico	Degrada moléculas orgánicas en CO ₂ y agua con cortos tiempos de exposición y sin generación de lodos.	Se pueden generar subproductos como halogenuros, metales, ácidos y aldehídos que pueden tener repercusiones negativas además de tener costos elevados.
	Coagulación	Buena eficiencia de remoción en periodos cortos de tiempo y bajos costos de inversión.	Genera una alta cantidad de lodos además de altos costos asociados a la disposición de estos.

Dentro de este grupo de colorantes se ha reportado que pueden llegar a ser extremadamente carcinogénicos y tóxicos tanto para el medio ambiente como para el humano, por esta razón el interés de su correcta degradación ha ido incrementando con el tiempo. Existen métodos biológicos que han demostrado ser potencialmente eficientes para la degradación de colorantes sintéticos en donde se utilizan microorganismos o sus enzimas (lark, et al., 2019). Para *Pleurotus ostreatus* se ha demostrado su capacidad para degradar colorantes textiles como azul de bromofenol,

verde brillante, rojo metil (Rhadika, et al., 2014), Azul brillante de Ramazol R (Lim, et al., 2013), Rojo Congo (Vats, et al., 2022), amarillo dorado, 2-6 dimetoxifenol (Martínez, et al., 2018) alcanzando hasta un 49% de remoción en este último (Vats, et al., 2022), además de reducir el porcentaje de inhibición causado por este tipo de colorantes hasta en un 75% (lark, et al., 2019).

En el presente proyecto se propone la decoloración de rojo Congo y azul de bromofenol a partir de extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH. El primero de estos colorantes es un colorante sintético ácido di azoico (National Center for Biotechnology Information, 2024), considerado carcinogénico debido a la presencia de una amina aromática en su estructura, además de ser resistente a la degradación natural debido a la presencia de estructuras aromáticas. Su uso en la industria textil se debe principalmente a sus propiedades como una amplia gama de tonos, resistencia a la decoloración y bajo coste de energía para su aplicación (Harja, et al., 2022). En la Fig. 8 se muestra la estructura del rojo Congo en donde se puede apreciar la presencia de los 2 enlaces azo además de 8 anillos aromáticos.

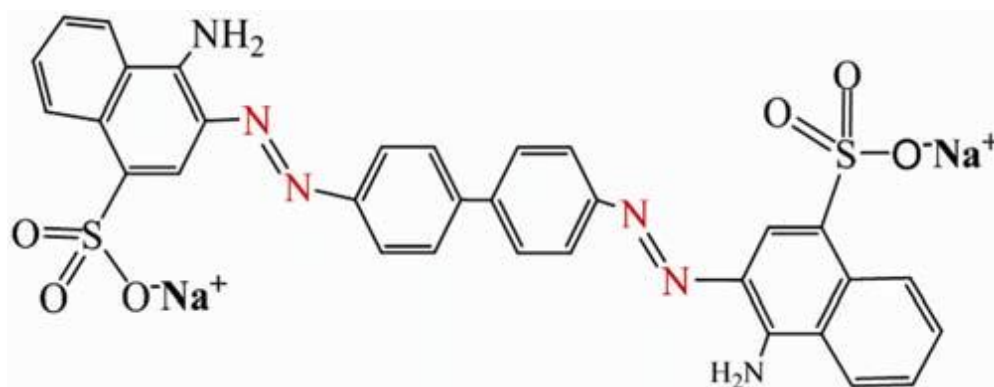


Fig. 8 Estructura del colorante rojo Congo (National Center for Biotechnology Information, 2024)

El azul de bromofenol es un colorante trifenilmetano utilizado tanto en investigación como colorante para telas como seda o piel, este es catalogado como tóxico, persistente y altamente contaminante en el agua debido a su alta solubilidad y estabilidad que causa daños a la vida acuática incluso en bajas concentraciones

(Anyanwu, et al., 2023). En la Fig. 9 se puede observar la estructura del colorante con los 3 anillos aromáticos que le dan su alta estabilidad.

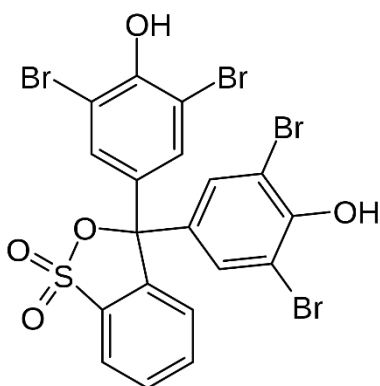


Fig. 9 Estructura del azul de bromofenol (National Center for Biotechnology Information, 2024)

2.4.3 El uso de RRH como biofertilizante

Actualmente existe un problema ligado a la calidad del suelo para su uso en el cultivo de diferentes plantas, esto se ha dado debido al excesivo cultivo que conlleva a la erosión, decremento de nutrientes y materia orgánica del mismo, provocando así una disminución en la fertilidad de este lo que conlleva a complicaciones en la agricultura (Queensland Government, 2023)

Una de las alternativas que se emplean desde el siglo XX y a la cual se le atribuye un incremento del 50% de la producción de los campos en ese periodo de tiempo, es el uso de fertilizantes químicos que proveen de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio al suelo, sin embargo, el uso inapropiado de este producto tiene efectos negativos en el suelo al alterar el pH, incrementar su acidificación, reducir el carbono orgánico y organismos benéficos afectando el crecimiento de cultivos de interés agrícola y el rendimiento de sus frutos (Krasilnikov, et al., 2022).

Existen otras posibles soluciones a esta problemática, al utilizar el RRH como biofertilizante, se ha reportado que provee de ventajas como: incrementar el rendimiento de cultivos, bajar precios, restaurar la estructura del suelo, mejorar la retención del agua, evitar inundaciones y reducir la necesidad de fertilizantes inorgánicos (Pathak, et al., 2021).

Como fertilizante el RRH es una buena fuente de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc, cobre y nitrógeno. Sin embargo, este no contiene la cantidad de nitrógeno necesaria para el crecimiento óptimo de una planta, además de que cada tonelada de RRH contiene 8 kg de N y 1.5 kg de P con una biodisponibilidad del 20% y 100% respectivamente (Velusami, et al., 2021).

En cuanto a la cantidad de carbono se tiene que por cada kilogramo entre 239 – 244.3 gramos para RRH de *Pleurotus ostreatus* y nitrógeno de 6.65 – 7.71 gramos, dando como resultado una relación C/N de 34.06 – 40.20 (Nadhim, et al., 2017). Un suelo sano debe de tener una relación C/N entre 8.5 y 11.5, sin embargo, cuando se habla de compostaje este valor puede estar entre 25 y 40 (Urbanisme, s.f.). Debido a esto existen estudios en donde el RRH se suplementa con un fertilizante comercial (Kwiatkowski & Harasim, 2021) o bien con composta previamente realizada (Oliveira, et al., 2021).

Los resultados de estos estudios indican que si bien, el realizar este tipo de suplementaciones pueden ayudar a obtener mayores rendimientos, crecimientos más rápidos y una mayor cantidad de aceites esenciales y antioxidantes, también se ha demostrado que el RRH por sí solo funciona como un buen fertilizante al hacer que los cultivos tengan mejores rendimientos a comparación de cuando este suplemento no es utilizado.

Actualmente una de las frutas más consumidas a nivel nacional es el jitomate cuyo consumo asciende hasta los 13.4 kg per cápita anual, siendo un alimento altamente atractivo para la población en general debido a que posee nutrientes como las vitaminas A, B1, B2 y C, fibra y minerales como potasio, calcio, fósforo, entre otros (Serrano, et al., 2023).

México es uno de los 10 principales productores a nivel mundial con un crecimiento de un 9.5% en la última década. En 2020 se produjeron 4.137 millones de toneladas de esta fruta siendo San Luis Potosí el segundo mayor productor a nivel nacional con un aporte del 11%. En el país únicamente el 15% del territorio nacional es apto para su

uso en el sector agrícola, esto debido a que el suelo de otras regiones es demasiado árido o corresponde a zonas sumamente montañosas (Ascenza, 2024).

III. Justificación

México es el cuarto productor a nivel mundial de cerveza, esto ha conllevado también a una alta generación de residuos como el bagazo de malta que cuando no es aprovechado de manera correcta termina en vertederos municipales. Sin embargo, en la actualidad se han reportado la aparición de vertederos clandestinos que se encuentran muy próximos a zonas residenciales provocando problemas en la salud de las personas, así como también medio ambientales por la falta de regulación.

Este residuo debido a la humedad que presenta tiende a descomponerse de manera rápida. Dado a su composición química, en su mayoría por material lignocelulósico, este residuo se podría emplear en aplicaciones como el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus*, además de que una vez cosechados los cuerpos fructíferos el RRH se puede utilizar para la recuperación de enzimas con diferentes aplicaciones biotecnológicas, así como también un suplemento de suelo para el cultivo de plantas.

De esta manera se puede dar la migración de un modelo económico lineal en las cervecerías hacia uno circular en donde se comiencen a valorizar los residuos como nuevas materias primas para la obtención de diferentes productos de valor agregado, en donde se promueva también a la economía y a la investigación local.

Así mismo, mediante este trabajo se puede cumplir con al menos 4 de los ODS establecidos por la ONU en el año 2015 como son los números: 2, hambre cero; 9, industria innovación e infraestructura; 11, ciudades y comunidades sostenibles; 12, producción y consumo responsable.

IV. Objetivos

4.1 Objetivo general

Aprovechar el bagazo de malta proveniente de la Microcervecería “La Legendaria” de manera sustentable, para el cultivo de los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor* a escala piloto, e impulsar el modelo económico circular local y el cuidado al ambiente, cumpliendo con 4 de las ODS (hambre cero; industria, innovación e infraestructura; ciudades y comunidades sostenibles; producción y consumo responsables) establecidas por la ONU.

4.2 Objetivos específicos

1. Establecer el procedimiento a escala piloto para el cultivo de los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor* utilizando bagazo de malta como principal sustrato.
2. Realizar los análisis proximales de los cuerpos fructíferos generados.
3. Analizar la actividad enzimática de los extractos fúngicos obtenidos del RRH con actividad de amilasas, celulasas, lacasas y xilanasas.
4. Estimar la capacidad de degradación de los colorantes rojo Congo y azul de bromofenol por los extractos enzimáticos recuperados.
5. Utilizar el RRH como un suplemento de suelo para el cultivo de jitomate.

V. Hipótesis

Si se logra aprovechar el bagazo de malta obtenido de la industria cervecera para el cultivo de hongos del género *Pleurotus* entonces se pueden obtener 3 bioproductos de interés como lo son:

- 1) Cuerpos fructíferos comestibles
- 2) Enzimas lignocelulolíticas con aplicación en biorremediación
- 3) Composta a partir del Residuo Remanente de Hongo

Promoviendo así el modelo económico circular local en San Luis Potosí

VI. Metodología

6.1 Análisis de materia prima

6.1.1 Prueba de compactación del bagazo

Se pesó un tubo de ensayo de 20 mL, se llenó hasta $\frac{3}{4}$ partes con bagazo y con una espátula se compactó hasta su máximo punto, se tomó la medida hasta el nivel del bagazo, se volvió a pesar el tubo y se realizó la siguiente operación:

$$\text{Índice de compactación} = \frac{\text{Peso de tubo con bagazo} - \text{peso de tubo solo}}{\text{Medida del bagazo en el tubo}} \quad (5)$$

6.1.2 Preparación del extracto líquido

Se tomaron 25 mL de agua, se colocó el bagazo de malta hasta que se cubriera en su totalidad con el líquido, se agitó por 15 minutos a 100 rpm, la muestra se filtró, se recuperó el sobrenadante para posteriormente ser centrifugado a 4,500 rpm durante 15 minutos. Nuevamente se recuperó el sobrenadante y se almacenó a 4°C para sus posteriores análisis (Diario Oficial de la Federación, 2012).

6.1.3 Análisis por sólidos suspendidos del exudado

Se tomó una muestra de 200 μ L del líquido preparado (5.1.2) la cual se dispuso en un refractómetro para posteriormente realizar la medición de los grados Brix obtenidos.

6.1.4 Medición de pH

Se realizó la medición con potenciómetro del líquido preparado (5.1.2) (Diario Oficial de la Federación, 2012).

6.1.5 Análisis de azúcares reductores del exudado

Se tomó una muestra de 20 μ L del líquido preparado (5.1.2) que se mezcló con 20 μ L de DNS (Anexo 10.1). La temperatura de la mezcla se elevó a 94°C por un periodo de 4 minutos para posteriormente enfriarla hasta temperatura ambiente. Se tomó la lectura de absorbancia a 540 nm (Miller, 1959).

6.1.6 Análisis de humedad del bagazo de malta

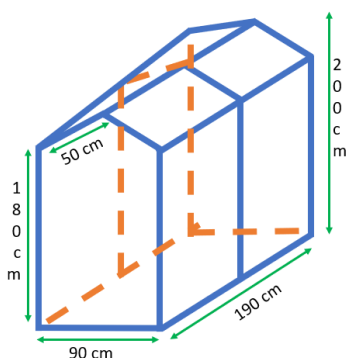
Se secó un crisol de porcelana a 135°C en horno de aire caliente por un periodo de 1 h, posteriormente se dejó enfriar en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, se agregaron 2 g de bagazo de malta. La muestra se pasó al horno a 135 °C por un periodo de 2 h. Terminado el tiempo el crisol con la muestra se dispuso en el desecador hasta alcanzar temperatura ambiente para ser pesada nuevamente. El porcentaje de humedad se determinó mediante la fórmula 6. Adaptado de (Padmore, 1990).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca} - \text{peso del contenedor}}{\text{peso muestra húmeda} - \text{peso del contenedor}} * 100 \quad (6)$$

6.2 Cultivo de hongos

Se realizaron mezclas con diferentes proporciones de bagazo de malta y rastrojo de maíz, se hicieron 5 combinaciones diferentes siendo 90%, 88%, 86%, 84% y 82% p/p de bagazo de malta y 10%, 12%, 14%, 16% y 18% p/p de rastrojo de maíz. Para todas las mezclas realizadas se adicionó cal correspondiente a un 5% del peso seco del peso total. Se tomaron muestras de las mezclas realizadas y se repitieron las pruebas del punto 5.1. En cuanto al control empleado, este se realizó con rastrojo de maíz adicionado también con la misma proporción de cal y con una humedad relativa del 70%. Las mezclas y los controles se esterilizaron por un periodo de 60 min. Se dejó enfriando por un periodo de 24 h o hasta alcanzar la temperatura ambiente para posteriormente inocular un 20% p/p de micelio de hongo en cada uno de los sustratos.

6.3 Diseño de invernadero a escala piloto



Para el montaje del invernadero se siguió el prototipo que se muestra en la Fig. 10, los materiales utilizados fueron: tuberías de PVC de 3/4", plástico de polietileno, registrador de humedad, temperatura y CO₂, controlador de humedad que permita que esta se mantenga en un rango de 70-80%, atomizador ultrasónico, controlador de temperatura para

mantenerla en un rango de 18-25°C, enfriador, un inyector y extractor de aire que se activen 1 vez cada dos horas y 1 ventilador.

6.4 Obtención de parámetros de crecimiento de hongos

Los parámetros descritos en la sección 1.8, se utilizaron para poder llevar a cabo la comparación de la eficiencia del crecimiento de los hongos en los diferentes sustratos.

6.5 Análisis proximales de los cuerpos fructíferos

6.5.1 Determinación de humedad

Se siguió el mismo procedimiento anteriormente descrito en la sección 5.1.6.

6.5.2 Determinación de cenizas

Se tomaron las muestras del punto 5.5.1 y se colocaron en la mufla (Thermo Scientific, F48055-60, USA) a una temperatura de 600°C por 2 h. Se dejó enfriar en desecador y posteriormente se pesó, acorde a la metodología modificada de (Association of Official Analytical Chemists, 1990).

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso seco muestra} - \text{peso cenizas}}{\text{peso seco muestra}} * 100 \quad (7)$$

6.5.3 Determinación de lípidos totales

Se pesaron 0.50 g de muestra seca y se colocaron en un papel filtro de 4.5*4.5 cm previamente pesado, este se enrolló sobre sí mismo hasta quedar en forma de cilindro y doblar las esquinas para evitar que el contenido se derramara. El papel filtro con la muestra se colocó en un extractor micro Soxhlet con 20 mL de éter de etilo, el extractor se conectó a un sistema de enfriamiento con agua a 10°C. La extracción se llevó a cabo a 45°C hasta completar 5 ciclos de recirculación del éter de etilo. Una vez completados los ciclos los papeles se dejaron secando en la campana de extracción por 24 h, pasado este tiempo se pesaron nuevamente. El porcentaje de lípidos se obtuvo con la siguiente fórmula: (Association of Official Analytical Chemists, 1990)

$$\% \text{ lípidos} = \frac{(\text{Peso muestra} + \text{Peso papel filtro}) - \text{peso papel filtro con muestra post tratamiento}}{(\text{Peso muestra} + \text{Peso papel filtro})} * 100 \quad (8)$$

6.5.4 Determinación de nitrógeno total

Se pesaron de 0.3 g a 0.4 g de muestra seca y se colocaron en un tubo Kjeldahl, posteriormente se adicionó 1 g de catalizador (4.98 g de sulfato de potasio y 0.02 g de sulfato de cobre pentahidratado) y 2.5 g de ácido sulfúrico concentrado. El tubo se calentó a una temperatura de 550°C en un digestor Kjeldahl hasta observar el cambio de coloración de negro a transparente. El tubo se retiró del digestor y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente para posteriormente agregar 10 mL de agua destilada. La muestra se colocó en un destilador y una vez que esta empezó a ebulir se agregaron 10 mL de hidróxido de sodio al 60%. El destilado se recibió en un matraz Erlenmeyer de 125 mL con 5 mL de solución saturada de ácido bórico y 2-3 gotas de indicador rojo de metilo – azul de metileno. Cuando se recolectó un aproximado de 50 mL de muestra en el matraz este se retiró del destilador y se tituló con una solución de ácido clorhídrico 0.1N hasta observar el cambio de un color verde a violeta claro.

El cálculo del porcentaje de proteína se hizo a partir de la ecuación: (Association of Official Analytical Chemists, 1990)

$$\% \text{ proteína} = \frac{(V \text{ HCl})(N \text{ HCl})(\text{Meq N})(6.25)(100)}{a} \quad (9)$$

En donde:

V HCl: volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación

N HCl: normalidad del ácido clorhídrico

Meq N: miliequivalentes del nitrógeno (0.014)

a: peso de la muestra

6.5.5 Determinación de fibra cruda

Se pesó 1 g de muestra seca que se colocó en un matraz Erlenmeyer al cual se le adicionaron 50 mL de ácido sulfúrico al 1.25%, se calentó a reflujo durante 30 minutos. Una vez terminado el tiempo se le adicionaron 50 mL de hidróxido de sodio al 3.52%

se calentó a reflujo durante 30 minutos. Posteriormente, se tomó un papel filtro Whatman #2 previamente secado y pesado para filtrar el contenido de la digestión. Se hicieron 3 lavados con agua desionizada a 80°C. El papel filtro y su contenido se dispusieron en un crisol previamente secado y pesado, este se llevó a una mufla a 135°C por 2 horas para después enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente. El crisol con la muestra se pesó, posteriormente la muestra se calcinó a una temperatura de 550°C por 20 minutos para después ser enfriada en un desecador hasta temperatura ambiente. Se registró el peso obtenido y se empleó la siguiente fórmula para obtener el % de fibra cruda (Association of Official Analytical Chemists, 1990).

$$\%fibra\ cruda = \frac{[(W_1 - W_{papel\ filtro}) - W_2]}{W_{muestra}} * 100 \quad (10)$$

En donde:

W1: Peso del papel filtro con muestra después del secado a 135°C por 2 horas

W2: Peso del papel filtro con cenizas después de la calcinación

6.5.6 Determinación de contenido fenólico total

Se pesaron 0.15 g de muestra seca, se maceraron en una solución de metanol al 80% en una relación 1:20 durante un periodo de 15 minutos con agitación constante, se dejó reposando en un frasco ámbar durante un periodo de 7 días y posterior a ello se filtró. Se tomó 1 mL y se evaporó el solvente de los extractos en 195 minutos en un Centrivap a TA (Eppendorf, Germany). Los estándares empleados fueron: 0, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 µg/mL en metanol agua 50:50 v/v. Se mezclaron 5 µL de muestra o del patrón con 50 µL de reactivo Folin-Ciocalteu 2 N (Sigma, EUA), 500 µL de agua miliQ y 400 µL de Na₂CO₃ 1M, se agitó por 10 segundos. Se calentó la muestra a 45°C por 15 minutos. Se midió la absorbancia a 750 nm. El resultado se expresó como mg equivalentes de ácido gálico por gramo de hongo seco (mg EGA/g muestra seca) modificado de (Gutiérrez, et al., 2008).

6.5.7 Determinación de carbohidratos totales

La cantidad de carbohidratos se realizó a partir del siguiente cálculo: (Elkanah, Oke, & Adebayo, 2022), que corresponde a la diferencia del valor de 100 menos el contenido de los otros componentes.

$$\% \text{ carbohidratos} = 100 - (\% \text{ proteínas} + \% \text{ cenizas} + \% \text{ lípidos} + \% \text{ fibra}) \quad (11)$$

6.6 Recuperación y análisis de extractos enzimáticos

6.6.1 Recuperación de enzimas

Se preparó una solución de citrato de sodio 50 mM pH 4.5. Se recuperó el sustrato remanente de hongo y se mezcló con la solución en una relación 1:20 (en este caso 5 g de RRH con 100 mL de solución), se agitó la mezcla por un periodo de 180 minutos a 200 rpm a temperatura ambiente, posteriormente se filtró, se centrifugó por 15 minutos a 4,500 rpm, se recolectó el sobrenadante en tubos Falcón de 50 mL y se almacenó a -20°C . Modificado de (Vats, et al., 2022).

6.6.2 Concentración de extractos enzimáticos

Las muestras se sometieron a un proceso de liofilización (Freezone 2.5, Labconco, USA) por un periodo de 16 horas a una presión de 1.650 mBar y temperatura de -45°C . Una vez pasado el tiempo las muestras se almacenaron en congelación a una temperatura de -20°C para sus posteriores análisis.

6.6.3 Análisis de concentración de proteínas

Se realizó una mezcla de 2 μL del extracto recolectado de la sección 5.6.1 con 158 μL de agua desionizada y 40 μL de reactivo de Bradford (Bradford, 1976), se dejó reposando por un periodo de 5 minutos a temperatura ambiente posteriormente se tomó la lectura de absorbancia a una longitud de onda de 595 nm.

6.6.4 Estandarización de los extractos enzimáticos

Una vez concentrados los extractos (5.6.3) se realizó una estandarización, de manera que todos los extractos tengan la misma cantidad de proteínas. Las muestras se llevaron a un volumen total de 1 mL utilizando la ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (13)$$

6.6.5 Ensayos cuantitativos

6.6.5.1 Reacción enzimática

La reacción enzimática se llevó a cabo por un periodo de 3 h utilizando 100 µL del sustrato con la fuente de carbono de interés y 100 µL del extracto enzimático. Una vez finalizado el tiempo se tomó una alícuota de 20 µL de la muestra y se mezclaron con 20 µL de DNS. La mezcla se elevó después a una temperatura de 95°C por un periodo de 4 minutos y se enfrió hasta alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente se midió la absorbancia a 540 nm para la actividad de amilasas, celulasas y xilanasas utilizando un espectrofotómetro (Nanodrop, Thermo Scientific, USA). Las condiciones para cada uno de los ensayos enzimáticos se muestran a continuación:

Amilasas: La reacción se llevó a cabo a una temperatura de 61°C. El sustrato se preparó en una solución con almidón soluble al 0.5% en buffer de acetato de sodio 100 mM pH 5.

Celulasas: La reacción se llevó a cabo a una temperatura de 37°C a 120rpm. Para el sustrato se utilizó una solución con Carboximetilcelulosa al 0.5% en buffer de acetato de sodio 100 mM pH 5 (Castillo & Martínez, 2022).

Xilanasas: La reacción se realizó a 37°C a 120 rpm con una solución de xilano 1% en buffer de acetato de sodio 100 mM. (Lim, et al., 2013).

Lacasas: La reacción se llevó a cabo utilizando un buffer de acetato de sodio 50 mM pH 4.65 con 1mM de ABTS a 40°C. Después de 10 min tras la adición de 100 µL de ácido tricloroacético al 20% (p/v) se detuvo la reacción. La oxidación de ABTS se determinó tras la lectura a 415 nm usando la siguiente ecuación basada en la ley de Beer – Lambert. (López & Paz, 2023); (Solís, et al., 2007):

$$\frac{U}{L} = \frac{\Delta Abs}{\varepsilon * V_m * t_{rxn}} * 1,000,000 \quad (14)$$

En donde:

ΔAbs = Cambio en la absorbancia tras la reacción enzimática

ϵ = Coeficiente de extinción molar del ABTS a 415 nm (36,000 mM⁻¹ cm⁻¹)

V_m = Volumen de la muestra (L)

t_{rx} = Tiempo de reacción

6.7 Decoloración de rojo Congo y azul de bromofenol

Se realizó la extracción del RRH de ambos hongos con 3 diferentes buffers: agua de grifo, citrato de sodio 50 mM pH 4.5 y fosfato de sodio 50 mM pH 7.0 en una relación 1 g: 20 mL de buffer de extracción con una agitación de 200 rpm durante 3 h (Lim, et al., 2013), posteriormente los extractos se congelaron a -20°C. Estos se liofilizaron después por un periodo de 24 h con una presión de 1.650 mBar a una temperatura de -50°C, se repitió la medición de proteínas por el método de Bradford y el análisis de lacasas.

Se prepararon 2 soluciones de colorantes una de azul de bromofenol (Rhadika, et al., 2014) y otra de rojo Congo (Vats, et al., 2022), ambas se realizaron utilizando una concentración de 0.05% w/v de colorante en buffer de citrato de sodio 50 mM pH 4.8 (Lim, et al., 2013). Los ensayos se realizaron por triplicado empleando 5 relaciones diferentes de enzima: colorante (20:80,40:60,50:50,60:40,20:80), los ensayos fueron realizados bajo las siguientes condiciones: a 32°C y 4°C con agitación (150 rpm) y sin agitación.

Las lecturas se tomaron cada 24 h por un periodo de 120 horas a una longitud de onda de 592 nm para azul de bromofenol y 498 nm para rojo Congo (Rafique, et al., 2021) utilizando una muestra de *E. coli* como control negativo ya que no cuenta con la maquinaria enzimática necesaria para llevar a cabo el proceso de decoloración. El porcentaje de remoción se calculó a partir de la siguiente ecuación obtenida a partir de un balance de materia y la fórmula de porcentaje de variación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{Abs\ i - Abs\ f}{Abs\ i} * 100$$

En donde:

Abs i: Absorbancia de la muestra inicial

Abs f: Absorbancia de la muestra final

6.8 Crecimiento de jitomate con RRH como suplemento de suelo

6.8.1 Variación de RRH con tierra de cultivo en un sistema de hidroponía

Este experimento se realizó con el objetivo de determinar la influencia de la adición de RRH en la tierra para el cultivo de semillas de jitomate en condiciones de hidroponía controladas en donde los nutrientes provenían únicamente de la tierra ya que el agua utilizada fue de la llave sin sales adicionadas.

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando dos muestras control una correspondiente únicamente a la tierra de cultivo (control tierra o CT por sus siglas) y otro control con únicamente RRH como material de cultivo (CRRH por sus siglas) y 2 muestras problema las cuales se prepararon adicionando RRH a la tierra de cultivo con una concentración de (Bajo RRH o BRRH por sus siglas) 14.218 g/L y 28.571 g/L, (Alto RRH o ARRH por sus siglas) correspondientes a 497.6225 q / ha y 10,000 q / ha (donde q / ha corresponde a quintal/ hectárea) (Pathak, et al., 2021).

Las mezclas realizadas se colocaron en charolas para sistema de hidroponía (IDOO Herb Garden Systems 12) con las paredes cubiertas con gasa estéril. Para cada una de las charolas se colocaron 4 semillas de jitomate, el sistema fue llenado con agua de la llave sin nutrientes adicionados, funcionando en ciclos de 12 h de luz y 12 h de oscuridad.

6.8.2 Medición de parámetros de crecimiento

6.8.2.1 Evaluación de la planta madura

Tras 45 días desde la siembra de las semillas se recolectaron las plantas y se midió el tamaño del tallo, el número de hojas y el tamaño de la raíz. Posteriormente se secó toda la planta siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.1.6 para determinar la humedad y el peso seco (Oliveira, et al., 2021).

6.8.3 Crecimiento de jitomate en tierra suplementada con RRH y con composta a partir de RRH

6.8.3.1 Elaboración de la composta

Se elaboraron 2 compostas a partir de las cantidades de RRH para baja y alta concentración del apartado 5.8.1. La composta de Bajo RRH (CBRRH) se realizó con las siguientes proporciones 14.218 g de RRH, 1 litro de tierra y 14 g de microorganismos de la montaña de la marca comercial Lupita Bonita, mientras la composta Alta (CARRH) se hizo con 28.571 g de RRH, 1 litro de tierra y 14 g de microorganismos de la montaña. Las mezclas se almacenaron por 30 días y cada 4 días se revolvía su contenido interno para promover la aireación del sustrato.

6.8.3.2 Determinación de la humedad de la composta

Se siguió el mismo procedimiento descrito en la sección 5.1.6

6.8.3.3 Diseño experimental y tratamientos

Se utilizaron 8 bandejas de propagación con 12 cavidades cada una de dimensiones 3.8*3.8*5 cm, de las cuales se emplearon 10 para cada uno de los tratamientos, y en cada cavidad se sembraron 10 semillas. Cada bandeja correspondió a un tratamiento diferente cuya distribución fue realizada a partir de un diseño de bloques aleatorio. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando 8 tratamientos: control positivo únicamente tierra, control negativo únicamente RRH, las 2 proporciones de la sección 5.8.1, las 2 de la sección 5.8.3.1 y 2 más del punto 5.8.3.1 pero esterilizadas con el fin de obtener información sobre el efecto de los microorganismos en la tierra para el crecimiento del jitomate. Los experimentos se distribuyeron acorde a la Fig. 11 en donde cada uno de los bloques corresponde a un tratamiento cuya distribución espacial fue hecha de forma aleatoria

CRRH como control negativo	ARRH
----------------------------	------

Control positivo	BRRH
CARRH	CARRH estéril
CBRRH	CBRRH estéril

Fig. 11 Diseño de bloques aleatorizado para la distribución de las bandejas de los experimentos realizados

6.8.3.4 Análisis microbiológico de los sustratos

Se tomó una asada de cada tratamiento y fue cultivada en PDA y PDB para posteriormente ser analizada al microscopio y realizar análisis morfológicos de los microorganismos obtenidos.

6.8.3.5 Determinación del pH de los sustratos para el crecimiento de jitomate

Se siguió la metodología descrita en la sección 5.1.4

6.8.3.6 Evaluación de las variables de crecimiento de las plantas maduras

Se registró el tiempo de germinación de las plantas, 35 días después del primer brote se realizó un conteo de plantas en cada una de las bandejas, el número de hojas reales, el tamaño de tallo y raíz, así como la determinación del peso seco y humedad de las plantas.

6.8.3.7 Determinación de la concentración de clorofila

Se pesaron 0.5 g de tejido foliar que se cortó en pequeños pedazos para ser secados con nitrógeno líquido y triturados para después ser macerados en 5 mL de acetona al 80% por 24 h, posteriormente se centrifugó a 2,000 rpm por 10 minutos. Se recuperó el sobrenadante y se aforo hasta 6 mL con acetona al 80%, la absorbancia se midió a 663 nm y 646 nm. La concentración de cada pigmento en $\mu\text{g/g}$ se determinó con las fórmulas:

$$Ca = 12.21A_{663} - 2.81A_{646}$$

$$Cb = 20.13A_{646} - 5.03A_{663}$$

Adaptado de: (Lichtenthaler & Wellburn, 1983).

6.8.3.8 Determinación de la humedad de las plantas

Se secó toda la planta siguiendo el procedimiento descrito en 5.1.6 para determinar su humedad.

6.9 Análisis estadístico de los datos obtenidos.

Los resultados obtenidos de los experimentos se analizaron en el programa STATISTICA v. 10 por medio de ANOVA con α de 0.05, los resultados obtenidos se compararon también por contraste de medias mediante el método de la diferencia menos significativa (LSD) de Fisher α de 0.05.

VII. Resultados y discusión

7.1 Análisis del bagazo y mezclas para el cultivo de hongos

El análisis de la materia prima es un factor importante en el crecimiento del hongo, de esta manera también se puede obtener información sobre el proceso cervecero, así como la eficiencia con la que este fue realizado. Si bien, actualmente los análisis de la materia prima se centran en diferentes parámetros como son: relación de sustratos utilizados (Elkanah, et al., 2022); (Varnero, et al., 2010), relación Carbono: Nitrógeno (Ruilova, et al., 2017); (Barba, et al., 2019), pH (Khan, et al., 2013); (Singh & Singh, 2019), humedad (Rivera, et al., 2022) y tamaño de partícula (Barba, et al., 2019), existen otros que no son considerados para el cultivo de hongos.

En este trabajo se propuso utilizar un nuevo parámetro llamado índice de compactación que permite predecir si el sustrato puede ser útil para el cultivo del hongo, o si es necesario agregar algún tipo de material de soporte (rastroy de maíz), esto debido a que parámetros como el tamaño de partícula no se pueden controlar en un rango de 5 – 6 cm (considerado óptimo para su crecimiento) (Barba, et al., 2019) como en el caso del bagazo de malta. Así mismo, se propuso realizar mediciones de parámetros como azúcares reductores del sustrato por medio de la prueba de DNS y medición de densidad por refractometría para poder determinar la presencia de azúcares remanentes del proceso de sparge en la matriz que sean fácilmente asimilables por el hongo (glucosa, maltosa, dextrinas).

En la Tabla 7 se pueden observar los resultados obtenidos de los parámetros evaluados con sus respectivas medias y errores estándar para la materia prima utilizada antes de cultivar los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor*. Siendo las mezclas entre bagazo de malta y rastroy de maíz las que presentan las mejores condiciones para el crecimiento de los hongos que se discutirán en los puntos posteriores.

Es importante considerar que el rastrojo de maíz es el cultivo control y por lo tanto estos parámetros se tomaron una vez que este se le dio su tratamiento previo de alcalinización y humidificación para su uso.

Tabla 7 Parámetros de los sustratos empleados para el crecimiento del hongo Pleurotus djamor

Muestra	Índice de compactación (g/cm²)	Densidad (g/cm³)	Azúcares DNS (mM glucosa)	pH	% Humedad	n
Bagazo de malta	1.5760 ± 0.1537 ^a	1.0071 ± 0.0005 ^a	20.1393 ± 2.4626 ^b	6.0183 ± 0.0867 ^a	67.24% ± 0.74% ^b	6
Rastrojo de maíz	1.5127 ± 0.0473 ^a	1.0018 ± 0.0001 ^c	1.0430 ± 0.02797 ^c	7.2500 ± 0.0324 ^b	83.12% ± 0.24% ^a	6
Bagazo al 90%	1.0649 ± 0.1083 ^b	1.0079 ± 0.0017 ^a	26.6418 ± 1.1758 ^a	7.1000 ± 0.1004 ^b	59.28% ± 0.54% ^c	6
Bagazo al 88%	0.8653 ± 0.0838 ^b	1.0116 ± 0.0057 ^{a,b}	26.3723 ± 2.0210 ^a	7.1133 ± 0.0797 ^b	58.06% ± 1.15% ^{c,d}	6
Bagazo al 86%	0.9293 ± 0.0263 ^b	1.0128 ± 0.0070 ^{a,b}	20.9350 ± 1.8860 ^b	7.1617 ± 0.0670 ^b	57.49% ± 1.38% ^{c,d}	6
Bagazo al 84%	0.9917 ± 0.0238 ^b	1.0063 ± 0.0024 ^{a,b}	17.3847 ± 1.7415 ^b	7.1200 ± 0.1076 ^b	55.94% ± 1.17% ^d	6
Bagazo al 82%	0.9577 ± 0.0282 ^b	1.0044 ± 0.0013 ^b	17.0323 ± 2.2721 ^b	7.0933 ± 0.1021 ^b	55.66% ± 1.35% ^d	6

Escala piloto (bagazo al 86%)	1.0095 ± 0.0371 ^b	1.0068 ± 0.0014 ^{a,b}	21.2465 ± 1.7460 ^b	7.3000 ± 0.0593 ^b	58.00% ± 0.83% ^{c,d}	6
----------------------------------	------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	---

En donde n es el número de muestras

7.1.1 El uso de rastrojo de maíz conlleva a un cambio en el índice de compactación

El índice de compactación es un parámetro propuesto que indica que tanto se puede compactar el sustrato que se usará para el cultivo de los hongos ya que un sustrato con alta compactación no permitirá la generación de canales de transferencia de gases y por lo tanto tampoco permitirá el intercambio de estos (Barba, et al., 2019). Durante el crecimiento del hongo es necesario que exista el cambio entre oxígeno y dióxido de carbono ya que el hongo mantiene un metabolismo aerobio desde el crecimiento del micelio (Zadrazil, 1975).

En este trabajo los resultados de la Fig. 12 muestran que el índice de compactación disminuye cuando se enriquece el sustrato con rastrojo de maíz, sin embargo, el análisis estadístico indica que no hay una diferencia significativa entre las mezclas que tienen entre 90% y 82% de bagazo ni a escala piloto al utilizar 84% de bagazo de malta. El valor de índice de compactación fue entre 0.8653-1.0649 ± 0.1087 g/cm². Del mismo modo no se observa una diferencia significativa entre la muestra de bagazo de malta y el rastrojo de maíz y posee un valor entre 1.5127-1.5760 ± 0.1537 g/cm².

Por lo tanto, el índice de compactación se reduce en un 30% al utilizar una mezcla de bagazo de malta con rastrojo de maíz con respecto a lo obtenido para las materias primas por separado, así mismo, al utilizar el bagazo de malta como sustrato para el cultivo *P. ostreatus* y *P. djamor* no se tuvo éxito ya que en todos los casos hubo contaminación por otros organismos. Sin embargo, en el control con rastrojo de maíz sí se presentó el crecimiento de los hongos deseados.

Si bien, el índice de compactación puede ser un parámetro para considerar para mejorar el éxito del cultivo y el crecimiento del hongo al momento de utilizar diferentes sustratos o mezclas de ellos, los resultados contrastantes del cultivo en bagazo y rastrojo indican que otros parámetros como el tamaño de partícula (Barba, et al., 2019) tienen efectos de mayor importancia.

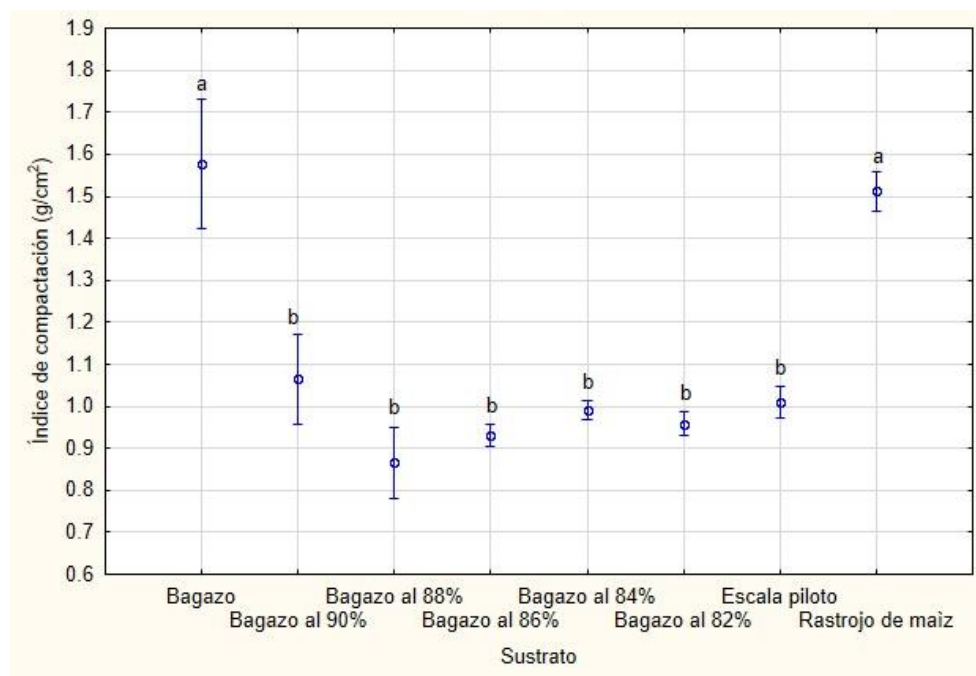
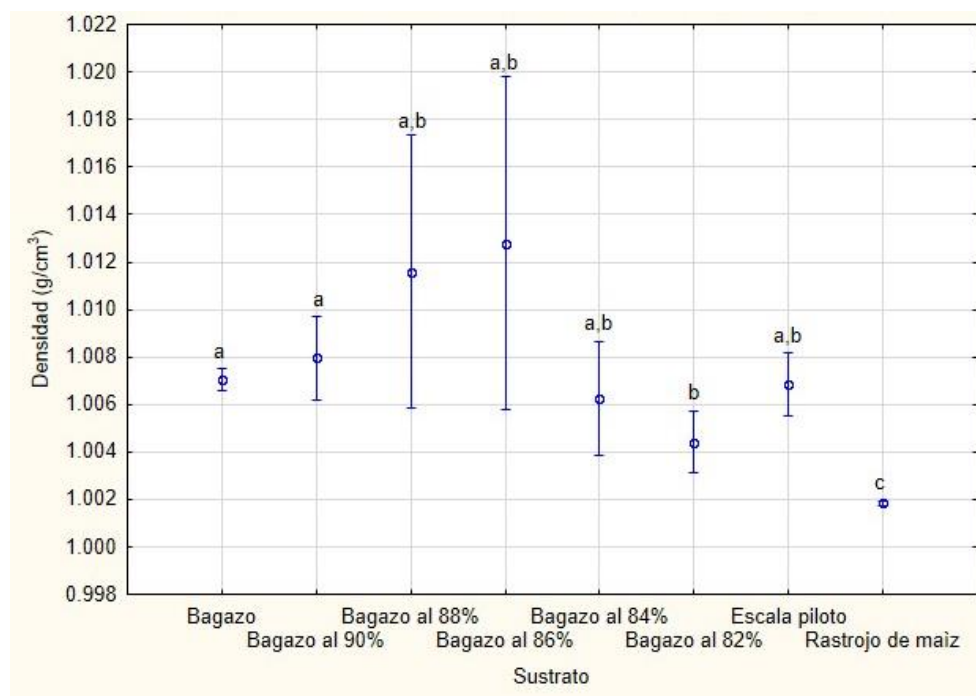


Fig. 12 Índice de compactación de bagazo de malta, rastrojo de maíz y sustratos empleados para el cultivo de hongos del género *Pleurotus*

7.1.2 La concentración de sólidos suspendidos en las mezclas es similar a la del bagazo de malta, pero un 41% mayor a la de rastrojo del maíz

Los resultados correspondientes a los sólidos suspendidos obtenidos a partir de la medición de grados Brix (°Bx) por refractometría de cada una de las muestras utilizadas se muestran en la Fig. 13, se puede apreciar que las mezclas de bagazo no presentan una diferencia en este parámetro con respecto al bagazo de malta teniendo valores entre 1.0063 a 1.0128 ± 0.0057 g/cm³. Sin embargo, la mezcla de 82% presentó una reducción de un 30% de °Bx. Mientras que, el rastrojo de maíz presentó una reducción de al menos un 41%. Esto sugiere que las mezclas al tener una mayor

concentración de sólidos suspendidos en la matriz, permiten que los hongos cultivados puedan aprovecharlos de manera eficiente, promoviendo así su crecimiento.



*Fig. 13 Densidad (g/cm³) medida por refractometría en el exudado de bagazo de malta, rastrojo de maíz y los sustratos utilizados para el cultivo de hongos del género *Pleurotus**

7.1.3 Las mezclas de bagazo de malta al 90% y 88% con rastrojo de maíz poseen un 52% más de azúcares reductores

La cantidad de azúcares reductores de cada una de las mezclas se muestran en la Fig. 14, estos indican que la concentración más alta de azúcares reductores se obtuvo cuando se utilizaron mezclas de sustrato de bagazo al 90% y 88%, presentando una concentración de azúcares de $26.6418\text{-}26.3723 \pm 2.0210$ mM respectivamente. Esto representa hasta 25 veces más concentración de azúcares en comparación con el rastrojo de maíz y hasta un 52% más en contraste con las demás proporciones de bagazo de malta.

Se espera entonces que el uso de mezclas con mayor proporción de bagazo de malta permita una mayor sacarificación y por lo tanto un mayor aprovechamiento de esta materia prima proveniente de la industria cervecera.

A partir de este parámetro se podría esperar que la mayor eficiencia biológica y rendimiento de los hongos cultivados sea al utilizar el bagazo a una proporción de 90% y 88%. Así mismo, en este contexto sería útil realizar esta prueba en la materia prima ya sea cuando se use una mezcla con bagazo de malta o algún otro sustrato lignocelulósico ya que podría ser de gran ayuda para poder predecir el éxito del crecimiento de este género de hongos, además de que se puede proponer el enriquecimiento de la materia prima con azúcares reductores con el fin de mejorar la eficiencia biológica y los rendimientos obtenidos.

Mediante análisis proteómicos se ha demostrado que los azúcares reductores tienen un efecto en el crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus*, ya que la presencia de glucosa en el sustrato promueve la traducción de proteínas necesarias para el proceso de degradación de macromoléculas así como la glucólisis, mientras que la presencia de xilosa promueve los procesos metabólicos de moléculas de bajo peso molecular, el ciclo del ácido tricarboxílico así como la producción de proteínas en los cuerpos fructíferos (Bakratsas, et al., 2024).

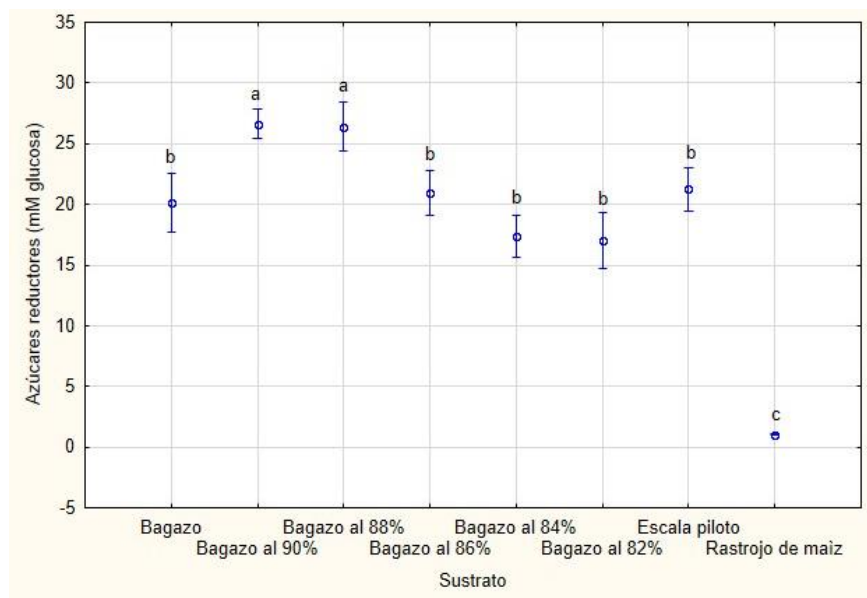


Fig. 14 Azúcares reductores presentes en el exudado de bagazo de malta, rastrojo de maíz y los sustratos utilizados para el cultivo de los hongos del género *Pleurotus*.

7.1.4 El valor de pH entre 7 - 7.3 en la matriz permite el desarrollo de los hongos

Los resultados de la medición de pH se muestran en la Fig. 15 en donde se observa que el valor de las mezclas de bagazo de malta y rastrojo de maíz no presentan una diferencia significativa entre ellas, sin embargo, si lo hacen con respecto al bagazo de malta sin tratar (sin óxido de calcio), además el valor de pH del bagazo de malta fue de 6.018 ± 0.086 , valor de pH que está por debajo del óptimo reportado para crecimiento de los hongos del género *Pleurotus*.

En el caso de estos hongos está reportado que el valor óptimo para el crecimiento del micelio varía entre 6.4 – 7.8 (Nkowo, et al., 2022); (Singh & Singh, 2019), mientras que en las mezclas tratadas el pH se encuentra dentro del rango de $7.093-7.300 \pm 0.1076$.

Por esta razón se esperaba que en todos estos sustratos los hongos del género *Pleurotus* crecieran de manera correcta ya que al estar en estos valores óptimos se beneficia la rápida y óptima colonización del micelio a través del sustrato, así como el rápido desarrollo de los cuerpos fructíferos (Singh & Singh, 2019), (Barba, et al., 2019).

En la sección 6.2.2 se discutirán a fondo los parámetros productivos de crecimiento de los hongos.

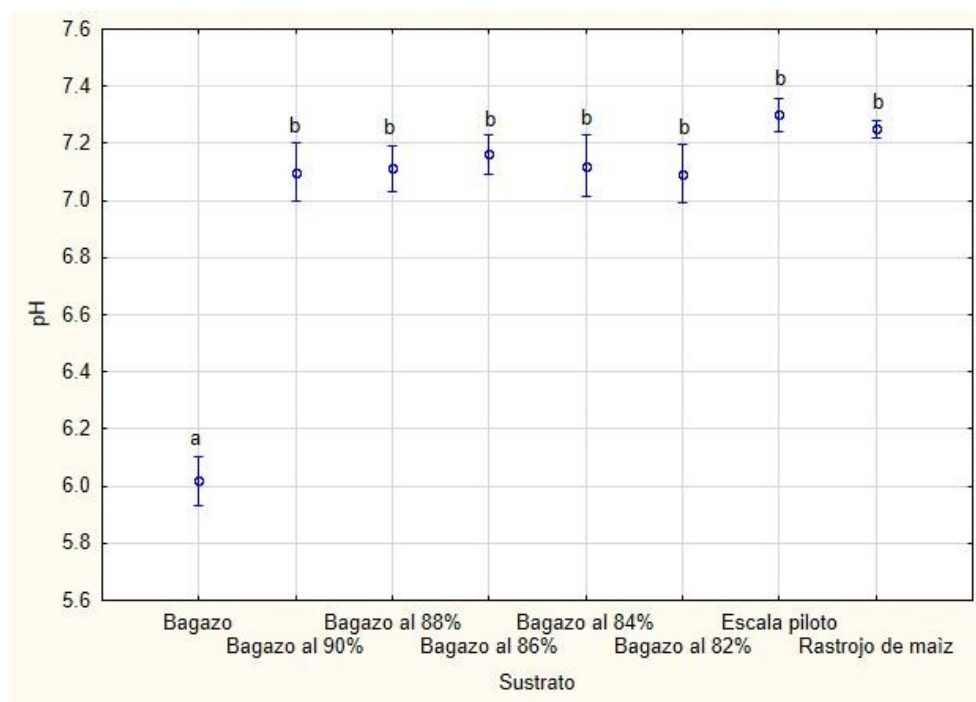


Fig. 15 Variación de pH en el bagazo de malta sin adición de óxido de calcio, rastrojo de maíz y los sustratos con óxido de calcio utilizados para el cultivo de los hongos del género *Pleurotus*.

7.1.5 La adición de rastrojo de maíz disminuye el porcentaje de humedad sin afectar el cultivo de los hongos

La humedad es de importancia para que el micelio pueda colonizar el sustrato de manera eficiente y rápida. Valores por debajo de 50% no son adecuados para el correcto crecimiento del micelio, mientras que valores por encima del 80% tienen efectos negativos en el crecimiento de los hongos de la especie *Pleurotus* (Rivera, et al., 2022).

Los resultados de la Fig. 16 indican que el rastrojo de maíz una vez que ha sido humidificado presenta un valor de humedad de $83.12\% \pm 0.24\%$, esto es un 16% más humedad en comparación con el bagazo de malta después de que este se recupera del proceso de maceración. Para las mezclas de sustrato (bagazo malta: rastrojo maíz)

las correspondientes al 84% y 82% presentaron una diferencia significativa en humedad con respecto a la mezcla de 90%; mientras que todas las demás no presentan diferencia alguna, y poseen valores de humedad entre 55.66% y 59.28% $\pm$ 1.38%. Por lo tanto, a excepción del rastrojo de maíz, todas las mezclas de sustrato con bagazo se encuentran dentro del rango óptimo de humedad para el crecimiento de los hongos.

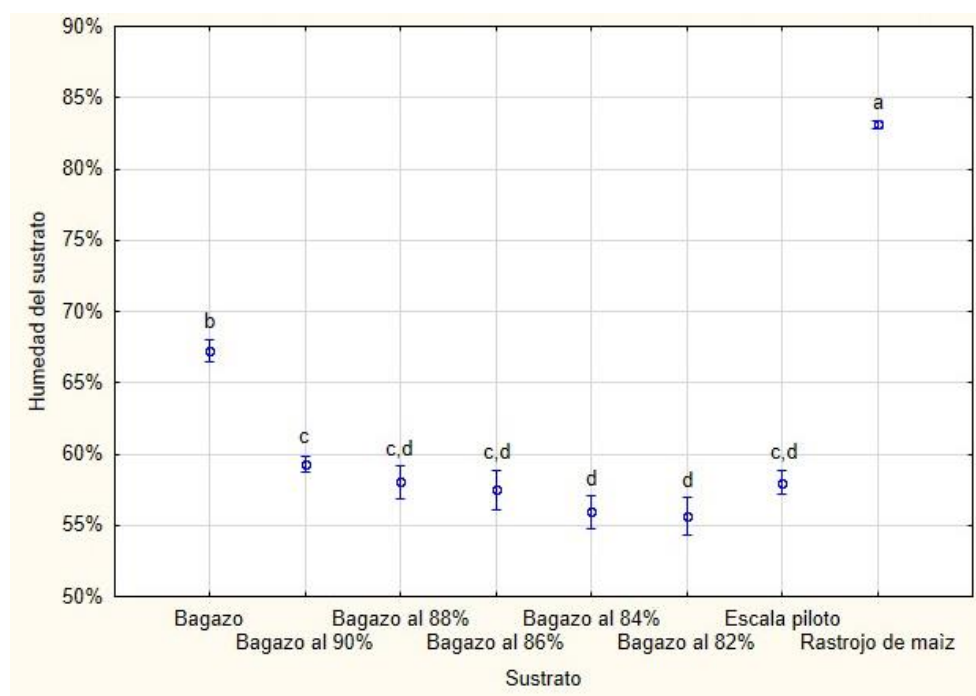


Fig. 16 Porcentaje de humedad en bagazo de malta, rastrojo de maíz (después de humidificarlo) y los sustratos utilizados para el cultivo de hongos del género *Pleurotus*.

7.2 La recuperación y adaptación de espacios es una práctica viable para la instalación de prototipos de cultivo de hongos

7.2.1 El primer prototipo permitió ensayar diferentes proporciones de mezcla de bagazo de malta con rastrojo de maíz

Se realizó un primer prototipo de cultivo de hongos a escala laboratorio con el fin de poder determinar la mejor proporción de mezcla, así como los parámetros requeridos de humedad para que los hongos tuvieran el mejor crecimiento. De igual manera se

midió el nivel de dióxido de carbono para asegurar que el diseño permitiera que este no se acumulara y afectara su crecimiento.

Dicho prototipo tenía las dimensiones 1 X 1 X 1 metro contando con un volumen de 1 m³ equivalente a un cuarto del volumen del prototipo final. Para los experimentos correspondientes en este apartado se utilizaron cubetas de 1 galón de capacidad con dimensiones de 18 cm de diámetro por 18 cm de largo dando una relación alto: diámetro de 1 y una capacidad de 1.25 kg de mezcla de sustrato inoculado.

En un inicio se optó por sembrar utilizando únicamente bagazo de malta como sustrato pero en todas las ocasiones hubo contaminación impidiendo así el crecimiento de los hongos, debido probablemente a la poca capacidad de transferencia de gases, por esta razón se decidió adicionar un sustrato complementario que fue el rastrojo de maíz.

En la Fig. 17 se muestra el espacio proporcionado para el desarrollo del proyecto, de lado izquierdo se puede apreciar el estado inicial del lugar el cual servía como almacén de material y mobiliario obsoleto. De lado derecho se muestra el primer prototipo terminado y funcionando. Este proyecto, por lo tanto, ofrece también una forma de recuperar y adaptar espacios para utilizarlos como lugares para la producción de hongos.



*Fig. 17 Espacio proporcionado para el cultivo de hongos del género *Pleurotus*, de lado izquierdo como fue proporcionado en un inicio y del derecho el primer prototipo implementado.*

Una vez que se determinó la mejor proporción para el crecimiento de los hongos del género *Pleurotus* (84% de bagazo de malta con 16% de rastrojo de maíz seco), que explicará a lo largo de los resultados presentados, se siguió con la implementación del prototipo del invernadero de hongos a escala piloto.

La construcción y escalamiento del invernadero se hizo utilizando diferentes piezas de PVC de $\frac{1}{2}$ ". 4 tramos de tubo de 2 metros fueron los que le dieron altura a la estructura, 8 tramos de 1 metro para el largo que se conectaron con coples entre sí para formar tramos de 2 metros y que a su vez se conectaron con los tramos de altura con 8 codos en t de PVC, la estructura se terminó de conectar entre sí con 4 tramos de 1 metro de PVC. Posteriormente se recubrió con plástico de polietileno transparente para que la luz pudiera ser captada por los hongos.

El sistema de humidificación se elaboró con dos cajas de plástico, una con medidas de 30 cm de ancho X 37 cm de largo y 19 cm de alto que funcionaría para arrojar aire

a través de ventiladores y otra con medidas de 30 cm de ancho X 42 cm de largo X 21 cm de alto que serviría como repertorio de agua, generación y distribución de vapor.

En la primera caja se instalaron 3 ventiladores con medidas de 8 X 8 cm con una alimentación de 12 V, potencia de 3W a una separación de 6 cm de la base y 1.5 cm entre ellos, ambas cajas se conectaron a través de 8 tubos de 20 cm de longitud. En la segunda caja que funcionó como repertorio de agua se colocaron 3 humidificadores de un cabezal marca Fogger™ con una eficiencia máxima de creación de neblina de 350 mL/h, consumo de 80 mL/h, potencia 20 W y 1 humidificador de 4 cabezales marca Fogger™ con una eficiencia máxima de creación de niebla de 600 mL/h, consumo de 140 mL/h, potencia de 24 W. De esta segunda caja se conectaron 8 tramos de 1 metro hacia el invernadero, cada uno con 5 cm de separación entre sus puntos centrales y formados en 2 hileras con 4 tubos, la hilera más baja tenía una separación de 12 cm desde el punto central hasta la base de la caja y la hilera superior una separación de 17 cm. Todos los tubos tuvieron una terminación con un codo a 30° apuntando hacia los contenedores con el sustrato con el objetivo de dispersar y humidificarlos de la mejor manera posible.

Para el control de la humedad se utilizó un higrostat digital Inkbird IHC – 200 doble relé con una potencia de conexión de 3 W y una máxima de 1,200 W al cual iban conectados todos los aparatos anteriormente mencionados al relé de humidificación. Esto da como resultado una potencia de 86 W cuando dicho relé se activaba, los parámetros seleccionados para este equipo fue un set point de 81% HR y un humidification differential value de 3%. En la Fig. 18 se muestra el diseño a escala piloto del invernadero propuesto con la representación de todo lo descrito anteriormente.

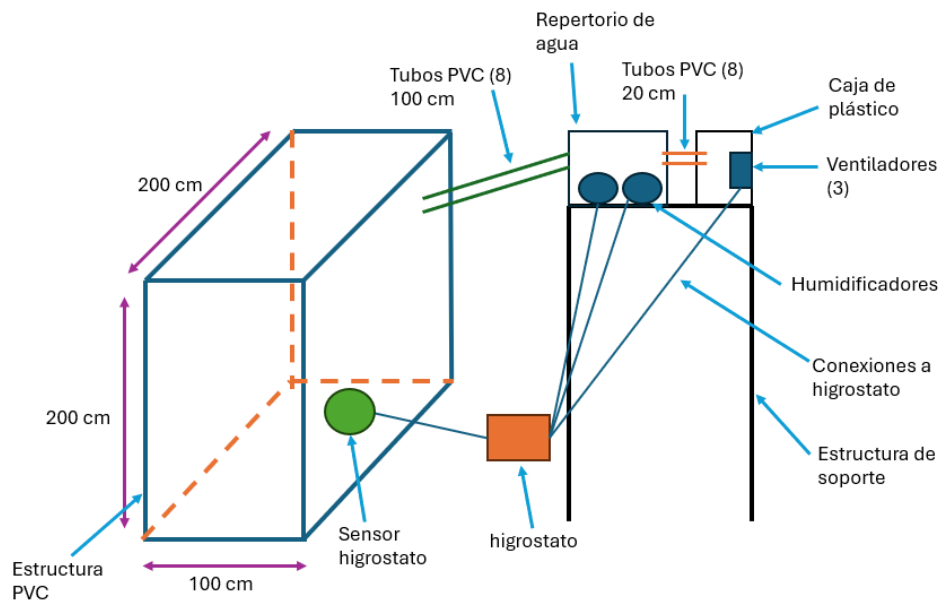


Fig. 18 Diagrama final del prototipo a escala piloto de invernadero para el cultivo de los hongos del género *Pleurotus*.

Se determinó que la mayor cantidad con la que el repertorio de agua podía estar lleno era de 10 litros, a su vez se debía de mantener por encima de los 5 litros para el correcto funcionamiento de los humidificadores. Se tomó el tiempo que el sistema tardaba en humidificar el invernadero hasta el valor preestablecido y cuanto tomaba para que la humedad bajara hasta volver a activarlo. Se tuvo entonces un tiempo de humidificación de 5 minutos y 10 minutos para volver a activar el sistema, por lo tanto, cada hora había un total de 4 activaciones equivalentes a 20 minutos de funcionamiento de sistema, un gasto energético de 30 W/h, un gasto de agua de 130 mL/h y una generación de neblina de 550 mL/h. Durante el día, el sistema funciona un total de 8 horas, teniendo un gasto energético de 240 W/h, un gasto de agua de 1040 mL y una generación de neblina de 4400 mL. Sin embargo, hay que tener en consideración que los resultados obtenidos se realizaron a temperaturas entre los 18-25 °C que fue la temperatura ambiental en el periodo de tiempo que se llevaron a cabo los experimentos.

Los cultivos a escala piloto se llevaron a cabo en cubetas de 5 galones de capacidad cuyas dimensiones eran 29 cm de diámetro y 36 cm de alto con una relación de alto:

diámetro de 1.25 y una capacidad estimada de 6.75 kg de mezcla de sustrato con micelio. En total para el último experimento de escalamiento se sembraron 5 cubetas del hongo *Pleurotus ostreatus* y 5 del hongo *Pleurotus djamor* procesando 67.5 kg de sustrato, sin embargo, no se utilizó en su totalidad la capacidad del invernadero, se estima que en total se puede disponer de hasta 24 cubetas lo que permitiría tratar un total de 162 kg de residuos de bagazo de malta en un espacio de 2 x 2 x1 metros.

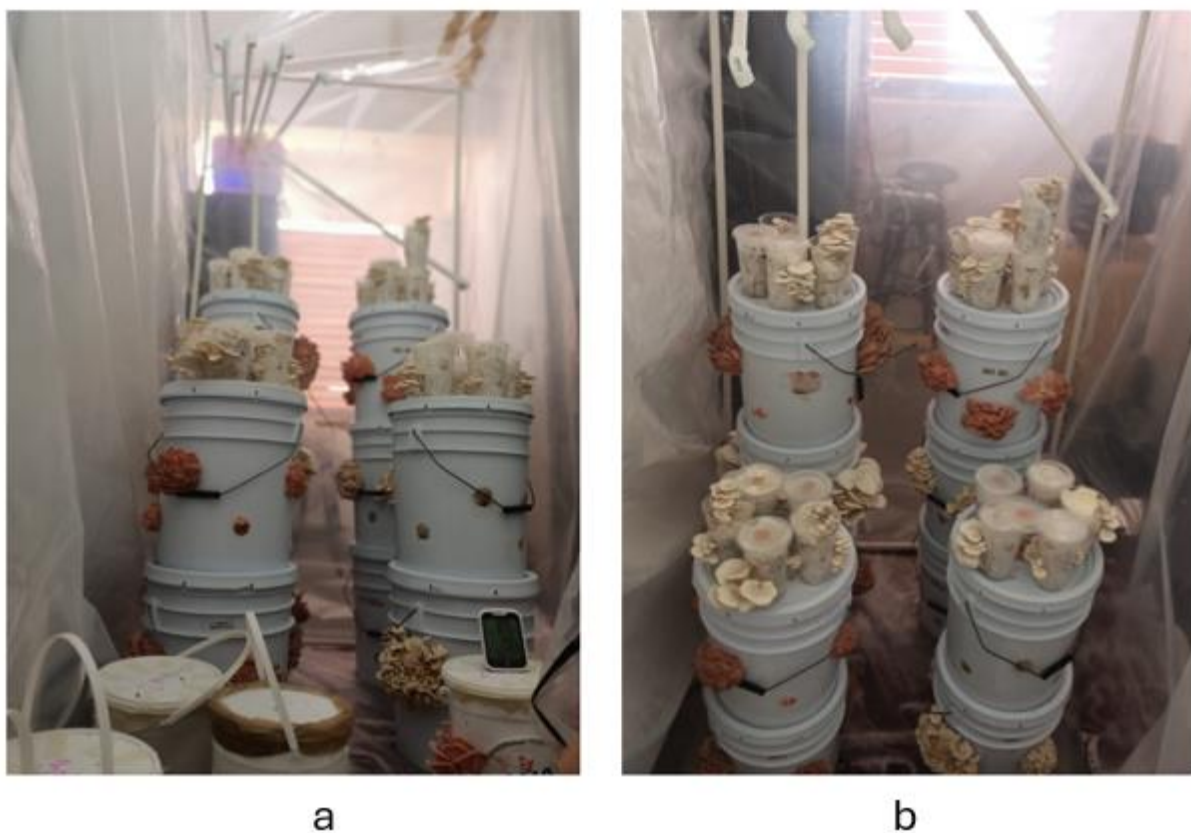
Con el fin de lograr la automatización completa del invernadero se instaló un temporizador de riego automático (modelo PT – GGCX marca PT™) a la toma de agua, que se activaba cada 2 horas, en donde la activación se hacía por un tiempo de 6 segundos equivalente a 100 mL, con esto no solo se evitaba tener que llenar de manera manual el repertorio de agua, sino que también se mantenía el agua a un mismo nivel permitiendo que los humidificadores ultrasónicos operaran en un nivel óptimo y así mismo se podían evitar contaminaciones al no tener que abrir dicho repertorio.

A continuación, en la Fig. 19 se muestran los componentes para el prototipo. En la parte superior izquierda (a) se puede apreciar el sistema de humidificación en donde la caja de la derecha es la que contiene los ventiladores mientras que la de la izquierda es el repertorio de agua con los humidificadores. En la parte superior derecha (b) se puede observar con más detalle el repertorio de agua con los humidificadores en donde el nivel se mantiene tantos cm por encima de los humidificadores para que estos funcionen de manera óptima. En la parte inferior izquierda (c) se puede observar el higróstato doble relé y las conexiones eléctricas que están en el relé de humedad, así como el valor de humedad en ese momento y su set point. Mientras que en la parte inferior derecha (d) se puede apreciar el sistema de distribución de aire compuesto por los 3 ventiladores descritos anteriormente.



Fig. 19 Componentes del invernadero utilizados para el cultivo de hongos del género Pleurotus.

En la Fig. 20 se muestra el invernadero terminado con dos vistas diferentes, de lado izquierdo se puede observar la imagen tomada de abajo hacia arriba en donde se aprecian los 8 tubos utilizados para humidificar al invernadero, así como el sistema de humidificación en el fondo y parte externa. De lado derecho se tiene la toma de arriba hacia abajo, en donde se puede apreciar la terminación de las tuberías que transportan el vapor hacia el interior del invernadero con sus terminaciones en codos de 30° apuntando hacia el cultivo de hongos.



*Fig. 20 Prototipo final de invernadero para el cultivo de hongos del género *Pleurotus* en dos vistas, desde la parte inferior (a) y desde la superior (b).*

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros evaluados para el crecimiento del hongo y su discusión correspondiente, así mismo, se decidió comparar en los gráficos y tablas los resultados de la escala piloto para determinar el efecto en el crecimiento de los hongos con base en el escalamiento ascendente (escala laboratorio a piloto). Conforme se vaya avanzando en la presente discusión se irá mencionando la razón por la cual se seleccionó la relación 86% bagazo de malta y 14% rastrojo de maíz para el cultivo a escala piloto.

7.2.2 Los parámetros de crecimiento de hongos son semejantes para casi todas las proporciones de bagazo de malta y rastrojo de maíz, pero son diferentes entre especies de hongos, cultivo control y escala piloto

Los parámetros del crecimiento de los hongos fueron calculados en un periodo de tiempo de 68 días. En la Tabla 8 se presentan los resultados para cada una de las mezclas preparadas, así como el control y la escala piloto y para cada hongo ensayado en el presente trabajo. Es importante recalcar que los experimentos se llevaron a cabo por un periodo de tiempo de 68 días, pero los resultados del PP se consideraron hasta el último periodo de fructificación.

Tabla 8 Parámetros productivos de los hongos del género *Pleurotus* cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto

Especie	Proporción	EB	PP (días)	TP	R	n
<i>P. djamor</i>	Control	36.71% ± 1.82% ^d	52.33 ± 2.96 ^a	0.61% ± 0.03% ^d	25.48% ± 0.99% ^c	3
	Bagazo 90%	48.06% ± 4.39% ^c	22.33 ± 4.33 ^b	0.80% ± 0.07% ^c	37.35% ± 2.89%^f	3
	Bagazo 88%	47.67% ± 2.60% ^c	21.33 ± 5.24 ^b	0.79% ± 0.04% ^c	33.32% ± 1.13% ^{d,f}	3
	Bagazo 86%	49.29% ± 4.34%^c	19.33 ± 3.33^b	0.82% ± 0.07%^c	32.16% ± 1.39% ^{d,f}	3
	Bagazo 84%	38.06% ± 3.75% ^d	21.33 ± 3.84 ^b	0.63% ± 0.06% ^d	25.19% ± 1.50% ^{d,f}	3
	Bagazo 82%	43.81% ± 5.26% ^{c,d}	24.33 ± 3.93 ^{a,b}	0.73% ± 0.09% ^{c,d}	27.18% ± 1.80% ^c	3
	Escala piloto	69.65% ± 1.90%^b	64.33 ± 2.33^c	1.16% ± 0.03%^b	61.40% ± 3.02%^b	3
<i>P. ostreatus</i>	Control	70.53% ± 0.73% ^b	49 ± 1.53 ^a	1.18% ± 0.01% ^b	68.58% ± 1.33% ^a	3

	Bagazo 90%	32.14% ± 4.13% ^d	39.33 ± 9.53 ^a	0.54% ± 0.07% ^d	28.11% ± 4.14% ^{c,d}	3
	Bagazo 88%	34.47% ± 4.16% ^d	40.33 ± 9.56 ^a	0.57% ± 0.07% ^d	30.23% ± 4.18%^{c,d,f}	3
	Bagazo 86%	37.52% ± 2.03%^d	38.67 ± 8.74 ^a	0.63% ± 0.03%^d	29.42% ± 0.99% ^{c,d}	3
	Bagazo 84%	35.75% ± 9.21% ^{c,d,e}	42.67 ± 10.04 ^a	0.60% ± 0.15% ^{c,d,e}	29.85% ± 7.04% ^{c,d,f}	3
	Bagazo 82%	24.66% ± 3.31% ^e	33.33 ± 7.96^a	0.41% ± 0.06% ^e	19.53% ± 2.87% ^e	3
	Escala piloto	80.68% ± 2.02%^a	53.33 ± 1.33^{a,c}	1.34% ± 0.03%^a	70.02% ± 3.20%^a	3

7.2.2.1 La EB es diferente entre las especies de hongos y la escala, pero no entre las proporciones utilizadas a escala laboratorio, con excepción del control de *P. ostreatus*

Los resultados de la eficiencia biológica (EB) se presentan en la Fig. 21 y muestran que existe una diferencia significativa entre ambas especies de hongos, siendo las muestras de la escala laboratorio del hongo *P. djamor* las que tienen un 31.4% más eficiencia biológica a comparación de las de *P. ostreatus*, mientras que la correspondiente a la mezcla de 84% de bagazo fue la que no presentó diferencia significativa del parámetro EB entre las especies de hongos.

La mayor EB para *P. djamor* y *P. ostreatus* se obtuvo en la proporción de bagazo de malta al 86% (49.29% ± 4.34% y 37.52% ± 2.03% respectivamente), si bien, en la mayoría de los casos no se presenta una diferencia significativa entre las muestras de la misma especie cultivadas a esta escala si lo hay con respecto a *P. ostreatus* al 82% con una reducción de al menos 23.3% en la EB. Al comparar con los controles se observó que la EB se vio favorecida para el cultivo de *P. djamor* con un incremento del 34%, mientras que para *P. ostreatus* hubo un decremento del 51%. Esta diferencia se puede dar debido a que diferentes especies del género *Pleurotus* pueden tener

diferentes requerimientos nutrimentales, mismos que son dados por el sustrato en donde son cultivados (Oropeza, et al., 2017).

Los resultados obtenidos en esta etapa se compararon con resultados de la literatura, esto es los resultados de EB que corresponden mezclas de bagazo de malta al 86% y rastrojo de maíz al 14%.

Para *P. ostreatus* se ha reportado una EB de $48.83\% \pm 0.60\%$ tras 2 fructificaciones cuando fue cultivado en *Terminalia ivorensis* (Familoni, et al., 2018), 98.3% en orujo de pera (Rodríguez, et al., 2018) y $118.5\% \pm 4.6\%$ en rastrojo de tomate (Sánchez, et al., 2008), en este trabajo a escala laboratorio se observó una EB de $37.52\% \pm 2.03\%$ siendo menor que todas las demás reportadas.

Sin embargo, al momento de realizar el cambio de escala a piloto este valor ascendió hasta $80.68\% \pm 2.02\%$. Por tanto, esta EB está dentro de los rangos reportados anteriormente y aumentó 2.15 veces a comparación de la escala laboratorio.

Para *P. djamor* se ha reportado en la literatura una EB de $70.56\% \pm 10\%$ en bagazo de agave *Salmiana* suplementado con urea al 1.5% (Velázquez, et al., 2021), $88.09\% \pm 13.58\%$ en mezcla de 80% de paja de trigo con 20% de peat moss (Valenzuela, et al., 2019), $73.7\% \pm 5\%$ en mezcla de 70% de cáscara de arroz con 30% de cartón (Saha, et al., 2022). En nuestro trabajo, la mezcla de 86% bagazo de malta con 14% rastrojo de maíz utilizada tuvo un valor de $49.29\% \pm 4.34\%$, lo que se encuentra por debajo de lo reportado en los anteriores reportes. Es importante notar que en los dos primeros casos se añade una fuente de nitrógeno al sustrato, promoviendo un mejor crecimiento.

En este estudio, al realizar el cultivo con esa misma proporción a una escala piloto se tiene un valor de $69.95\% \pm 1.90\%$, y representa un incremento de 1.42 veces en comparación de la escala laboratorio, siendo este valor semejante a los resultados reportados en literatura, aunado a que el resultado presentado en este trabajo posee un error estándar menor.

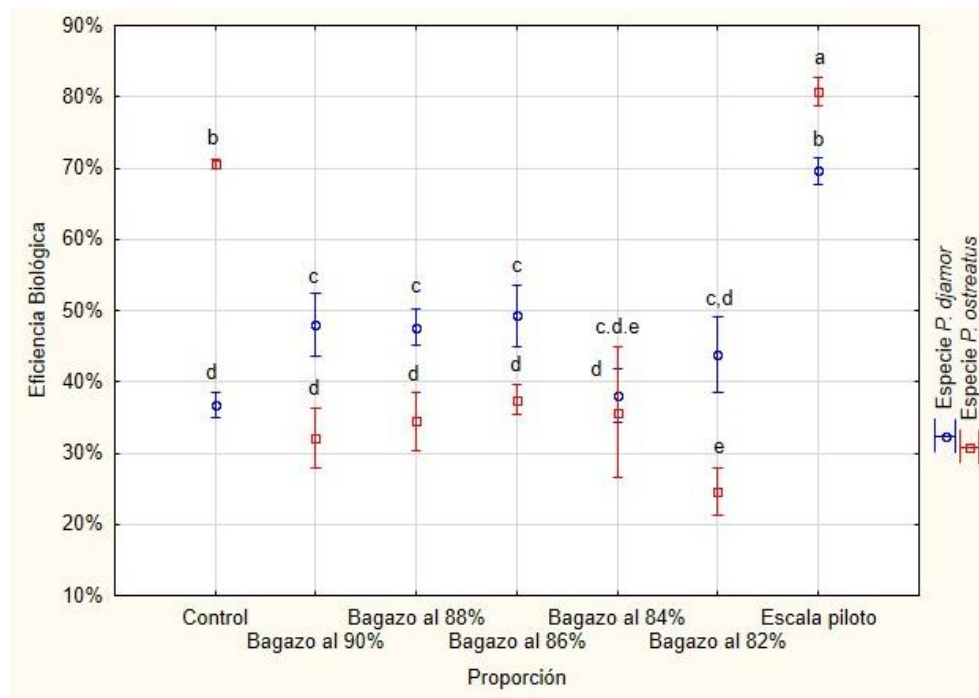


Fig. 21 Eficiencia biológica para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.

7.2.2.2 El valor del PP entre las especies cultivadas a escala piloto es diferente

Los resultados del periodo productivo (PP) se muestran en la Fig. 22 y se muestra que existe una diferencia significativa del valor del PP entre las muestras cultivadas en los diferentes sustratos según la especie de hongo. El valor de este parámetro preferentemente debe de ser el más bajo con el mismo número de fructificaciones, o bien, si es mayor es conveniente siempre y cuando incremente proporcionalmente la eficiencia biológica y el rendimiento obtenido. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de los ensayos fue de 68 días, sin embargo, se consideró el PP hasta el último periodo de fructificación.

Se puede apreciar que en los experimentos desarrollados a escala laboratorio, el hongo *P. djamor* (19.33 ± 3.33 días) tiene un PP 50% menor a comparación de *P. ostreatus* (38.67 ± 8.74 días). Así mismo, se observó que entre las muestras de la misma especie en las diferentes proporciones de sustratos, no existe una diferencia significativa del valor del PP. En cuanto a los controles se tiene que el PP aumentó

2.71 veces para *P. djamor* (52.33 ± 4.33 días) mientras que en *P. ostreatus* el aumento fue de 1.27 veces (49 ± 1.53 días).

Al momento de realizar el escalamiento con la proporción de 86% bagazo de malta y 14% rastrojo de maíz se obtuvo un incremento del PP para *P. djamor* de un 233% (64.33 ± 2.33 días) y para *P. ostreatus* de un 38% (53.33 ± 1.33 días). Al momento de comparar entre ambas especies de hongo se tiene que el PP para *P. djamor* es 1.21 veces mayor.

De acuerdo a lo reportado en la literatura, se observó que cuando *P. ostreatus* se cultiva en *Terminalia ivorensis* tuvo un PP de 26.3 ± 0.4 días (Familoni, et al., 2018), en orujo de pera de 45 días (Rodríguez, et al., 2018) y en rastrojo de tomate de 40 días (Sánchez, et al., 2008), al comparar con lo observado en este trabajo el valor de PP es semejante en la escala laboratorio pero no así a nivel piloto en donde el valor puede ser hasta 2 veces mayor.

Para *P. djamor* se ha reportado que el valor del PP es de 60 ± 3 días (Velázquez, et al., 2021) cuando se cultivó en bagazo de agave *Salmiana* suplementado con urea al 1.5%, en mezcla de 80% de paja de trigo con 20% de peat moss (musgo que pertenece al género *Sphagnum*) es de 53.80 ± 1.79 días (Valenzuela, et al., 2019) mientras que en mezcla de 70% de cáscara de arroz con 30% de cartón es de 35.2 ± 1.64 días (Saha, et al., 2022). En nuestro trabajo este parámetro se favoreció ya que su valor a escala laboratorio fue 3.11 veces menor a lo reportado, sin embargo, a escala piloto fue aproximadamente 1.83 veces mayor.

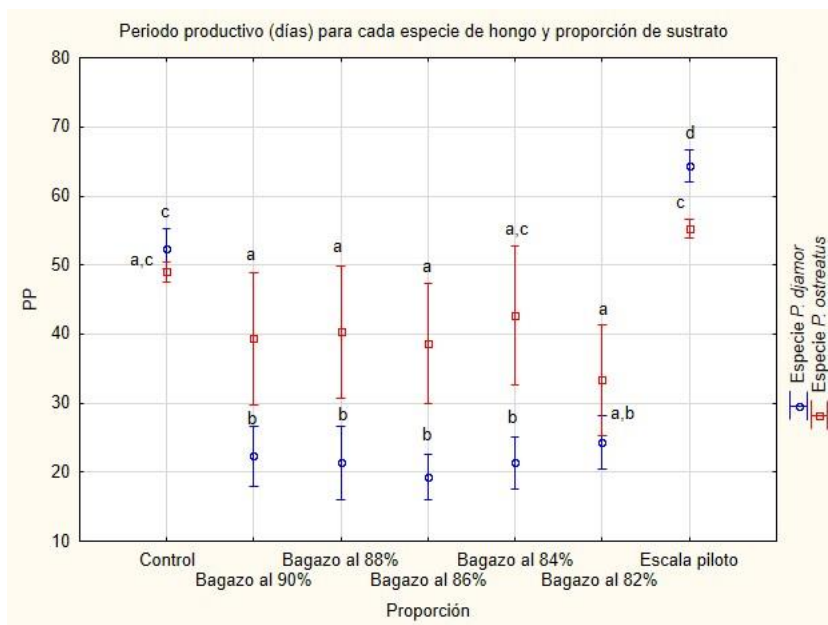


Fig. 22 Periodo productivo para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.

7.2.2.3 Existe diferencia en el valor de TP entre las especies cultivadas y la escala empleada, pero no entre muestras de la misma especie a escala laboratorio

Los resultados correspondientes a la tasa productiva se muestran en la Fig. 23 en donde se puede apreciar que en la mayoría de los casos de las muestras a escala laboratorio hay una diferencia significativa del valor de TP entre las especies *P. djamor* y *P. ostreatus* a excepción de la correspondiente a bagazo al 84%. En este parámetro lo que se busca es la proporción con mayor TP, ya que este indica el mejor desarrollo y aprovechamiento del hongo en su sustrato al considerar tanto la eficiencia biológica (EB) como el periodo productivo (PP) (Ruilova, et al., 2017). Dicho de otra manera, este parámetro indica que tanto aprovecha el hongo el sustrato en el que es cultivado conforme cada día que pasa desde la inoculación del micelio hasta la última cosecha.

Similar a los casos anteriores se puede observar que la TP presentó variación con el cambio de escala. Así mismo, se puede apreciar que en la escala laboratorio en la mayoría de los casos no existe una diferencia entre los sustratos utilizados, únicamente hay un efecto negativo en el valor de TP en un 21% para *P. djamor* y 24%

para *P. ostreatus* y corresponden a las mezclas de bagazo al 84% y 82%, respectivamente. Sin embargo, se observó que el valor de TP para *P. djamor* tiene un incremento de un 30% con respecto a la especie *P. ostreatus*.

La mezcla de bagazo al 86% para *P. djamor* posee una TP de $0.82\% \pm 0.07\%$ y para *P. ostreatus* un valor de $0.63\% \pm 0.03\%$. Lo anterior, la TP para *P. djamor* representa 1.34 veces más con respecto de la TP del control, mientras que para *P. ostreatus* la muestra en bagazo de malta tiene un valor 1.87 veces menor de TP con respecto al control.

Al momento de realizar el escalamiento los valores de TP se incrementaron para *P. djamor* el valor obtenido fue de $1.16\% \pm 0.03\%$ lo que representó un aumento de 1.41 veces con respecto a su misma proporción a escala laboratorio, mientras que para *P. ostreatus* el valor fue de $1.34\% \pm 0.03\%$ esto fue 2.13 veces mayor.

Acorde con los resultados previamente reportados por otros autores se sabe que cuando *P. ostreatus* se cultiva en *Terminalia ivorensis* tiene una TP de $1.86\% \pm 0.1\%$ (Familoni, et al., 2018), en orujo de pera de 3.6% (Rodríguez, et al., 2018), en rastrojo de tomate de $2.9\% \pm 0.1\%$ (Sánchez, et al., 2008), por lo que resultados obtenidos en este estudio poseen valores de 2 o 3 veces por debajo de lo reportado en la literatura.

Para *P. djamor* los reportes en la literatura indican que cuando este es cultivado en bagazo de *Agave salmiana* suplementado con urea al 1.5% el valor de TP es de $1.18\% \pm 0.2\%$ (Velázquez, et al., 2021), en mezcla de 80% de paja de trigo con 20% de peat moss el valor es de $1.64\% \pm 0.25\%$ (Valenzuela, et al., 2019) y en mezcla de 70% de cáscara de arroz con 30% de cartón $2.09\% \pm 0.3\%$ (Saha, et al., 2022). En este caso las muestras correspondientes a escala laboratorio se encuentran por debajo de lo reportado en la literatura, sin embargo, la muestra a escala piloto tiene un valor similar al reportado en el crecimiento de bagazo de *Agave salmiana*.

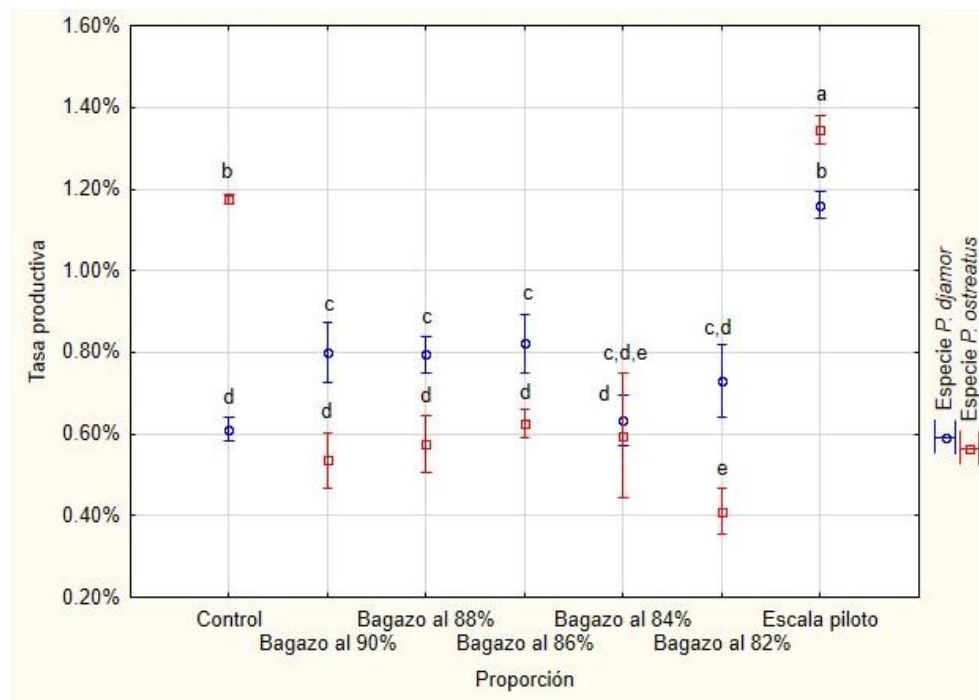


Fig. 23 Tasa productiva para cada una de las proporciones utilizadas, rastreo de maíz y escala piloto.

7.2.2.4 Hay diferencia en el rendimiento entre las especies cultivadas y el escalamiento.

Los resultados correspondientes al rendimiento obtenido para ambas especies de hongos en los diversos sustratos y escalas empleadas se muestran en la Fig. 24. Con respecto de la escala laboratorio las proporciones de bagazo al 90% y 82% mostraron diferencias significativas en rendimientos con respecto al control, para las especies *P. djamor* y *P. ostreatus* en un 25% y 28% respectivamente, siendo el primero el de mayor rendimiento. En este caso el parámetro es importante para determinar si la cepa tiene factibilidad comercial (Oropeza, et al., 2017).

Al momento de realizar el escalamiento se observó un incremento considerable a comparación de las muestras a escala laboratorio con la misma proporción de bagazo, para *P. ostreatus* el rendimiento es 1.87 veces mayor mientras que *P. djamor* tuvo un valor 1.91 veces mayor. Al comparar ambos hongos en dicha escala se tiene que *P. ostreatus* presenta un valor 1.14 veces mayor que *P. djamor*.

Los resultados previamente reportados en la literatura indican rendimientos para *P. ostreatus* de 35% en orujo de pera (Rodríguez, et al., 2018), 38.06% $\pm$ 8.36% en 80% paja de trigo con 20% peat moss (Valenzuela, et al., 2019), 8.3% $\pm$ 0.3% en rastrojo de tomate (Sánchez, et al., 2008). Los resultados presentados en este trabajo indican un rendimiento al menos 1.84 veces mayor en la escala piloto a comparación de lo presentado en la literatura indicando que el trabajo desarrollado es mejor en este aspecto.

Mientras que para *P. djamor* el rendimiento reportado es de 19.77% $\pm$ 2.34% en madera de castaña, 28.81% $\pm$ 2.34% en madera de haya (Kılıç, 2020) y 28.66% $\pm$ 4.45% mezcla 80% paja de trigo con 20% peat moss (Valenzuela, et al., 2019). Similar al caso anterior los resultados a escala piloto presentan valores hasta 3.11 veces mayor con lo reportado, indicando así el potencial que se tiene al momento de realizar el escalamiento.

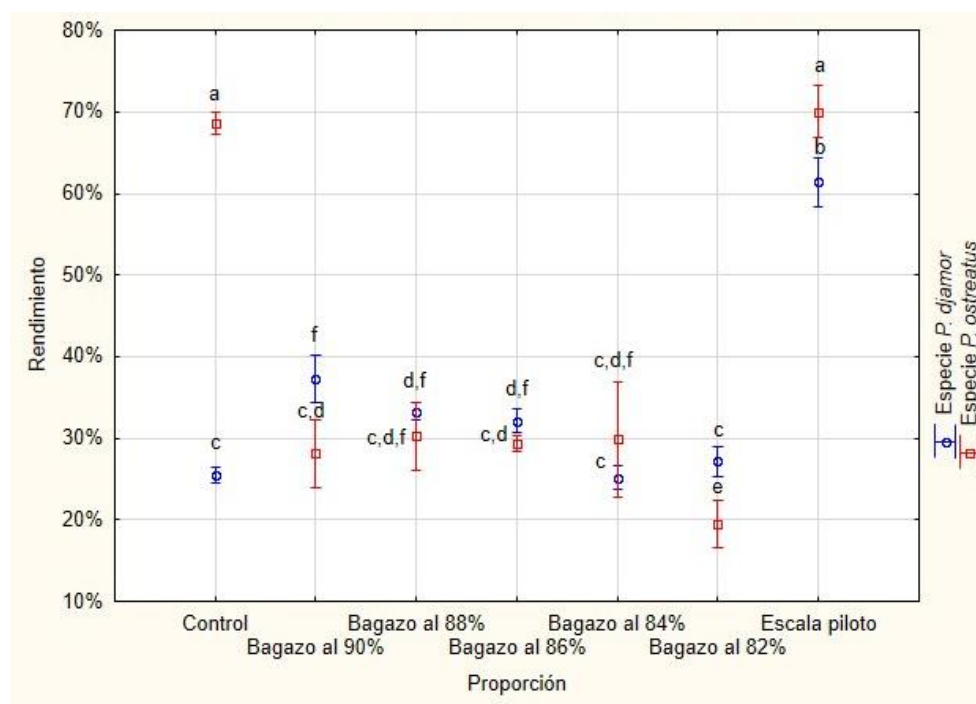


Fig. 24 Rendimiento para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto.

7.2.2.5 Mejoramiento de los parámetros productivos de ambos hongos

Los resultados obtenidos y comparados con la literatura en las sesiones anteriores indican que los valores de EB y TP tienen margen de mejora, en lo subsecuente se traduciría a una mayor producción de hongos y por lo tanto una mayor producción de alimentos. A continuación, este trabajo plantea las siguientes mejoras que se pueden implementar en lo sucesivo para el diseño del invernadero, así como al momento de la preparación del sustrato.

La luz es un parámetro importante para mejorar el rendimiento de los hongos cultivados, esto debido a que funciona como un factor de modulación durante la agregación de las hifas y la maduración de los carpóforos (Oropeza, et al., 2017). *P. djamor* requiere de 750 - 1500 luxes mientras que para *P. ostreatus* este valor es de 1000 – 1500 luxes (Stamets, 1993), se recomienda un fotoperiodo de 8 – 12 horas por día para ambas especies ya que un largo periodo de oscuridad conlleva a deformación de cuerpos fructíferos, elongación de los estipes y una mala coloración de los carpóforos (Nwoko, et al., 2022). En el presente trabajo este parámetro no fue controlado, sería útil corroborar si el diseño propuesto permite que los hongos se encuentren en este rango durante su crecimiento.

La aireación durante el proceso de fructificación permite el desarrollo correcto de los carpóforos ya que un nivel elevado de CO₂ afecta de forma negativa la calidad de los hongos producidos (Oropeza, et al., 2017). *P. djamor* requiere un nivel de CO₂ entre 500 – 1500 mg/L, mientras que *P. ostreatus* tiene un óptimo cuando este valor está por debajo de 1000 mg/L, dicha medición se puede realizar mediante el uso de sensores de CO₂. Así mismo, se ha demostrado que al ingresar aire fresco al lugar donde se desarrollan los hongos tiene un efecto benéfico para estos mismos, requiriendo entre 4-8 ingresos por hora (Stamets, 1993).

Un parámetro importante en el sustrato para el cultivo de hongos es la relación C/N, se ha demostrado que el suplementar el sustrato con una fuente de nitrógeno externa puede incrementar en un 50% el rendimiento de *P. ostreatus*, así como incrementar hasta en un 28% las proteínas presentes en el cuerpo fructífero. Sin embargo, si la

concentración de nitrógeno es excedente el micelio no será capaz de colonizar el sustrato (Ruilova, et al., 2017). Considerando el principio de economía circular algunos de los residuos agroindustriales que se podrían utilizar como suplemento para incrementar la cantidad de nitrógeno en el sustrato serían salvado de trigo (relación C/N 18.65), residuos post producción de biogás (relación C/N 11.25) (Zhou, et al., 2018), harina de semilla de algodón (relación C/N 4.97) e incluso se podría aprovechar la levadura inactiva obtenida tras el proceso de fermentación de cerveza (relación C/N 6.88) (Henrique, et al., 2024).

Se puede proponer además realizar la cuantificación de nitrógeno y carbono orgánico por el método de Kjeldahl y el método de pérdida por ignición (LOI) (Cargua, et al., 2015) respectivamente, del sustrato empleado para compararlo con los sustratos con mejores rendimientos en la literatura y suplementar el sustrato para que el valor C/N sea lo más cercano a dichos sustratos comerciales.

7.3 Los análisis proximales indican que existe relación en algunos nutrientes como las proteínas, la fibra, los carbohidratos y el contenido fenólico total según la proporción de bagazo de malta con rastrojo de maíz.

Los resultados de los análisis proximales de cada uno de los hongos cultivados en sus diferentes proporciones y escala se muestran en la Tabla 9. Dichos resultados se analizan por separado en los siguientes apartados.

Tabla 9 Análisis proximales de los hongos de los hongos del género Pleurotus cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto

Especie	Proporción	Humedad	Carbohidratos (g / g muestra seca)	Fibra (g / g muestra seca)	Proteínas (g/g muestra seca)	Lípidos (g / g muestra seca)	Cenizas (g / g muestra seca)	Contenido total fenólico (mg eq ác. Gálico / g muestra seca)	n
<i>P. djamor</i>	Control	84.78% ± 3.24% ^{a,b}	0.3406 ± 0.0270 ^{b,c}	0.2495 ± 0.0211^a	0.2973 ± 0.0125 ^{a,d}	0.0245 ± 0.0039 ^{a,b}	0.0881 ± 0.0092^{a,b}	1.6628 ± 0.2163 ^a	3
	Bagazo 90%	84.68% ± 2.27% ^{a,b}	0.3959 ± 0.0255^{a,b}	0.1439 ± 0.0122 ^c	0.3655 ± 0.0228 ^b	0.0133 ± 0.0019 ^b	0.0814 ± 0.0073 ^{a,b}	2.7543 ± 0.1372 ^{d,b}	3

	Bagazo 88%	83.99% ± 3.86% ^{a,b}	0.3479 ± 0.0235 ^b	0.1574 ± 0.0149 ^c	0.3808 ± 0.0140 ^b	0.0279 ± 0.0035 ^a	0.0860 ± 0.0083 ^{a,b}	2.6845 ± 0.1473 ^b	3
	Bagazo 86%	86.29% ± 0.89%^a	0.3459 ± 0.0354 ^{b,c}	0.1814 ± 0.0099 ^{b,c}	0.3733 ± 0.0397 ^{b,c}	0.0140 ± 0.0042 ^b	0.0854 ± 0.0077 ^{a,b}	3.0125 ± 0.1106^{b,c}	3
	Bagazo 84%	86.23% ± 2.15% ^{a,b}	0.3556 ± 0.0200 ^b	0.2134 ± 0.0073 ^b	0.3387 ± 0.0096 ^{a,b}	0.0299 ± 0.0033 ^a	0.0847 ± 0.0167 ^{a,b}	1.8945 ± 0.1044 ^a	3
	Bagazo 82%	84.63% ± 1.63% ^{a,b}	0.2922 ± 0.0165 ^c	0.1965 ± 0.0049 ^{b,c}	0.4179 ± 0.0164^c	0.0076 ± 0.0010^c	0.0748 ± 0.0059 ^{a,b}	1.5469 ± 0.1482 ^a	3
	Escala piloto	86.64% ± 1.61% ^{a,b}	0.3709 ± 0.0191 ^b	0.1724 ± 0.0119 ^c	0.3518 ± 0.0062 ^b	0.0186 ± 0.0055 ^b	0.0869 ± 0.0111 ^{a,b}	2.1723 ± 0.1771 ^a	3
<i>P. ostreatus</i>	Control	86.15% ± 4.08% ^{a,b}	0.3947 ± 0.0448 ^{a,b}	0.1141 ± 0.0133 ^d	0.2230 ± 0.0316 ^e	0.0180 ± 0.0039 ^b	0.1148 ± 0.0209^a	1.9877 ± 0.2369 ^a	3
	Bagazo 90%	82.23% ± 2.04% ^{a,b}	0.4379 ± 0.0226^{a,b}	0.1790 ± 0.0025^c	0.3155 ± 0.0122 ^a	0.0061 ± 0.0014^c	0.0966 ± 0.0133 ^{a,b}	3.5335 ± 0.1292^c	3
	Bagazo 88%	75.83% ± 6.61% ^b	0.4098 ± 0.0246 ^{a,b}	0.1262 ± 0.0044 ^d	0.3312 ± 0.0222 ^{a,b}	0.0165 ± 0.0013 ^b	0.0851 ± 0.0043 ^{a,b}	3.3713 ± 0.1885 ^c	3
	Bagazo 86%	87.49% ± 1.17%^a	0.3507 ± 0.0328 ^b	0.1300 ± 0.0010 ^d	0.3602 ± 0.0359^{a,b}	0.0260 ± 0.0044 ^{a,b}	0.0817 ± 0.0066 ^{a,b}	3.0345 ± 0.2712 ^c	3
	Bagazo 84%	78.79% ± 6.68% ^{a,b}	0.3801 ± 0.0209 ^b	0.1198 ± 0.0075 ^d	0.3096 ± 0.0227 ^{a,d}	0.0105 ± 0.0034 ^{b,c}	0.0864 ± 0.0028 ^{a,b}	2.1805 ± 0.1644 ^a	3
	Bagazo 82%	77.16% ± 7.58% ^{a,b}	0.4214 ± 0.0072 ^a	0.1207 ± 0.0186 ^d	0.2859 ± 0.0022 ^d	0.0140 ± 0.0039 ^b	0.0822 ± 0.0015 ^{a,b}	1.7803 ± 0.1007 ^a	3
	Escala piloto	85.53% ± 1.78% ^{a,b}	0.3435 ± 0.0274 ^b	0.1095 ± 0.0028 ^d	0.3455 ± 0.0148 ^{a,b}	0.0345 ± 0.0080 ^a	0.1041 ± 0.0127 ^b	2.2100 ± 0.1512 ^a	3

7.3.1 La cantidad de humedad en los cuerpos fructíferos no varía en la mayoría de las proporciones empleadas

Los resultados de humedad de cada uno de los hongos en los diferentes sustratos y escalas empleados se muestran en la Fig. 25. En este caso se puede apreciar que en la mayoría de las muestras no hay una diferencia estadísticamente significativa a excepción de *P. ostreatus* en bagazo al 88%. En los demás casos el rango presentado osciló entre 77.16% ± 7.58% y 86.64% ± 1.61% además de que no hubo diferencia entre las muestras a escala laboratorio y piloto.

Para la especie de *P. ostreatus* los reportes en la literatura indican diferentes valores según el sustrato utilizado, los valores para paja suplementada con fertilizante NPK

(10 kg: 6 g) son de $84.33\% \pm 5.32\%$ (Shalahuddin, et al., 2019), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) $91.06 \pm 3.12\%$ (Valenzuela, et al., 2019) y en raquis de maíz 90.57% (Hoa, et al., 2015).

De igual manera para *P. djamor* los valores de este parámetro varían según el sustrato y cuyos valores para paja de trigo son $87.04\% \pm 0.11\%$ (Nayak, et al., 2022), en paja de trigo suplementada de 10% de bagazo de caña $89.35\% \pm 0.29\%$ (Hasan, et al., 2015) y en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de $93.64\% \pm 2.36\%$ (Valenzuela, et al., 2019).

Para ambas especies de hongos los resultados de este trabajo son semejantes a los reportados en la literatura, esto se puede deber principalmente a la capacidad de retención del agua del sustrato, sin embargo, existen otros factores que pueden afectar a este parámetro como son edad del hongo, humedad relativa, cepa cultivada y condiciones post – cosecha (Hoa, et al., 2015). Así mismo se ha comprobado que la disponibilidad de agua tiene una influencia directa en la hidrólisis de proteínas siendo que cuando este soluto se encuentra por encima del 30% del peso húmedo este proceso es afectado negativamente (Butré, et al., 2014).

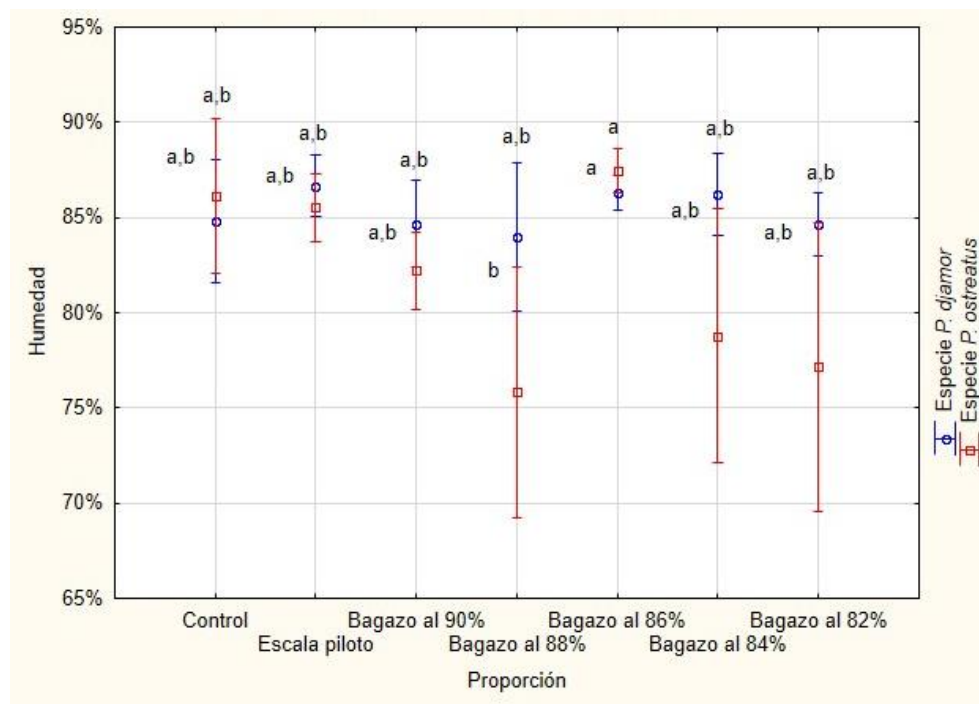


Fig. 25 Porcentaje de humedad para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.2 La cantidad de carbohidratos en los cuerpos fructíferos no varía con respecto a las proporciones utilizadas, pero es menor con respecto al valor reportado en la literatura.

Los resultados correspondientes a la cantidad de carbohidratos presentes de los cuerpos fructíferos de cada uno de los sustratos, así como para cada hongo cultivado y sus respectivos controles y escalamiento se muestran en la Fig. 26. Se puede apreciar que en la mayoría de los casos no existe una diferencia estadísticamente significativa.

Únicamente las mezclas correspondientes de bagazo al 82%, presentaron diferencia significativa en ambos hongos, para *P. ostreatus* se observó un incremento de hasta un 20% con respecto a otras proporciones como bagazo al 86%. En cuanto a *P. djamor* se aprecia un decremento de hasta 35.5% con respecto a la muestra de bagazo al 90%. Para ambos hongos se tienen valores que oscilan de 0.34 a 0.40 g de carbohidratos / g materia seca.

Reportes en la literatura indican que para *P. ostreatus* la cantidad de carbohidratos varía según el sustrato, por ejemplo si el hongo se cultiva en paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) se tiene un valor de 0.3342 ± 0.035 g / g muestra seca (Shalahuddin, et al., 2019), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) 0.5242 ± 0.0240 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019), en paja de chufa 0.4628 ± 0.0007 g / g muestra seca (Mairami, et al., 2022) y en raquis de maíz 0.3078 (Hoa, et al., 2015).

En el presente estudio el valor obtenido para *P. ostreatus* a escala piloto (0.3435 ± 0.0274 g / g muestra seca) presenta una diferencia estadísticamente significativa con lo reportado en la literatura, de hasta un 53% menos al compararlo con la mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%), y teniendo un valor similar al reportado en paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) y raquis de maíz.

Para *P. djamor* se reporta que cuando este se cultiva en paja de trigo, la cantidad de carbohidratos es de 0.4649 ± 0.36 g / g muestra seca (Nayak, et al., 2022), en bagazo de caña suplementado con el 10% de paja de trigo 0.4901 ± 0.0170 g / g muestra seca (Hasan, et al., 2015), en paja de arroz 0.4475 ± 0.0202 g / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) 0.5131 ± 0.0364 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019). El resultado de la cantidad de carbohidratos para *P. djamor* en este trabajo a escala piloto fue de 0.3709 ± 0.0191 g / g muestra seca, con una diferencia menor en un 20.6% con respecto a paja de arroz y hasta 38.3% con la mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%).

Los carbohidratos presentes en los cuerpos fructíferos varían en concentración, la mayor parte corresponde a glucosa con un 65.21%, además de presentar galactosa en 19.33%, fucosa 6.68%, manosa 6.24% y ácido glucurónico 2.53%, así como polisacáridos complejos como la quitina 2% (Zhou, et al., 2016).

Dichos carbohidratos presentan efectos benéficos a la salud de los humanos. La glucosa es la fuente primaria de energía del cuerpo y es de donde las células son capaces de obtener energía (Medlineplus, 2024). Se recomienda que su consumo sea

menor a 30 g por día en adultos ya que pasar dicha cantidad conlleva a problemas de salud como ganancia de peso, cáncer, diabetes tipo 2, entre otros (National Health Service, 2023). Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que si se quisiera llegar al máximo de consumo de glucosa se requerirían 124 g secos de *P. djamor* y 134 g secos de *P. ostreatus*.

En cuanto a la galactosa este monosacárido actúa como un protector para diversos órganos como el hígado además de ayudar a mantener la homeostasis metabólica (Fos, et al., 2023). Reportes en la literatura indican que un consumo de galactosa entre 1,000 – 2,000 mg en adultos mejoran la glicosilación de lípidos y proteínas (Shakerdi, et al., 2022). Por lo tanto, si con los hongos producidos en este trabajo se quisiera obtener la cantidad diaria de galactosa exclusivamente de *P. djamor* se requeriría un consumo entre 13.95 – 27.9 g de muestra seca, mientras que con *P. ostreatus* el consumo sería entre 15.06 – 30.12 g de muestra seca.

La fucosa está comprobado que ayuda al establecimiento de una microbiota saludable, además de proveerle de protección contra agentes patógenos e infecciones (Garber, et al., 2021). Se considera que un consumo seguro y favorable de fucosa en la dieta humana es de 5 mg/ kg de peso, considerando una persona de 70 kg esto sería 350 mg (Unión Europea, 2023). Con los datos obtenidos sería necesario consumir 14.11 g de muestra seca de *P. djamor* y 15.28 g de muestra se de *P. ostreatus*.

Mientras que la manosa puede ayudar a evitar infecciones de vías urinarias al prevenir la adherencia bacteriana en las células uro epiteliales (Cooper, et al., 2022). Para la prevención de dichas infecciones se recomienda un consumo de 2 g por día, mientras que para el tratamiento de una infección la dosis se incrementa a 1.5 g dos veces al día (Carter, 2023). Por lo tanto, para la prevención de infecciones de vías urinarias se requeriría un consumo de 85 g de muestra seca de *P. djamor* y 93 g de muestra seca de *P. ostreatus*.

En el caso del ácido glucurónico se ha comprobado que este es un metabolito clave involucrado en la desintoxicación de compuestos xenobióticos (Ho, et al., 2019)

apoyando de esta manera a las funciones desintoxicantes del hígado presentando así una propiedad hepatoprotectora (Martínez, et al., 2020). Reportes en ratones indican beneficios en el consumo de este ácido con dosis de 250 mg/ kg/ día en su aparato reproductor (Karpova, et al., 2001). Si se considerase esa dosis para humanos se tendría que para una persona de 70 kg serían necesarios 265 g de muestra seca de *P. djamor* y 287 g de muestra seca de *P. ostreatus*.

La quitina está comprobada que tiene beneficios para el sistema inmune además de mejorar el proceso de digestión por lo cual puede ser utilizado en pacientes con problemas de obesidad u otros desordenes metabólicos (Doctrow, 2023). Estudios realizados con aves indican que una dieta enriquecida con 3 g/ kg de peso conllevan a la pérdida de peso (Koide, 1998). Si se considera ese consumo se tendría entonces que se deberían de consumir 405 g de muestra seca de *P. djamor* y 441 g de muestra seca de *P. ostreatus*

Por lo tanto, el consumo de los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* es seguro en cuanto a carbohidratos al necesitar cantidades muy grandes para alcanzar el límite recomendado para glucosa, así mismo podría ser atractivo para suplementar la dieta humana en cuanto a requerimientos de galactosa y fucosa, sin embargo, no sería viable utilizarlo como suplemento para alcanzar las dosis diarias de manosa, ácido glucurónico ni quitina.

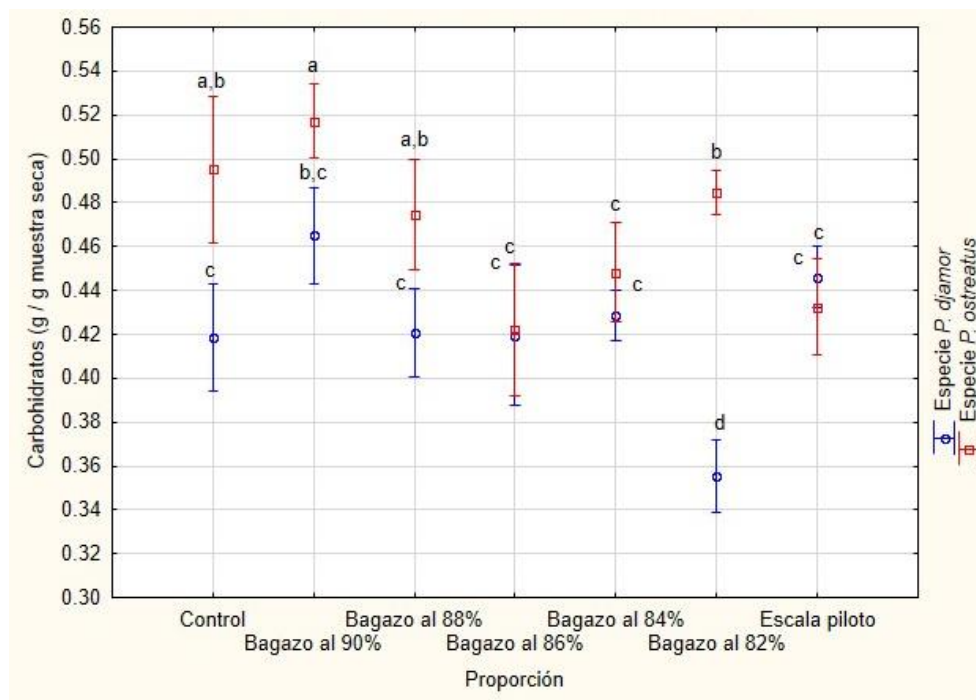


Fig. 26 Carbohidratos (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.3 La cantidad de fibra varía según la proporción de sustrato, y tipo de género cultivado, siendo *P. djamor* el que presenta la mayor cantidad

Los resultados correspondientes a la cantidad de fibra de los cuerpos fructíferos para cada una de las proporciones utilizadas en el cultivo de ambos hongos, así como el control y la escala piloto se muestran en la Fig. 27. En este caso, se puede apreciar que existe una diferencia significativa entre las diferentes proporciones, así como los controles utilizados. Para *P. djamor* la mayor cantidad de fibra se encuentra en la muestra control con una diferencia de 17% con respecto a la muestra de bagazo al 84% que es la que le sigue en valor, las demás muestras no presentan diferencia estadísticamente significativa.

Para *P. ostreatus* la muestra correspondiente a bagazo al 90% es la que contiene la mayor cantidad de fibra, con una diferencia de 37.7% con respecto a la muestra de bagazo al 86% que es la que le sigue de valor, en cuanto a las demás muestras incluyendo al control no existe una diferencia significativa. Los resultados muestran

además que a excepción de la proporción de bagazo al 90% el hongo *P. djamor* contiene al menos un 24.7% y hasta un 78% más de fibra con respecto a *P. ostreatus*.

La cantidad de fibra varía según el sustrato en el que se cultivan los hongos, para *P. ostreatus* cultivado en paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) se observó un valor de 0.2585 ± 0.0357 g / g muestra seca (Shalahuddin, et al., 2019) en 50% tallo de palma con 50% paja de trigo fue de 0.1103 ± 0.09 g / g muestra seca (Elkanah, et al., 2022), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) se reportó 0.1177 ± 0.0244 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019), en paja de chufa fue 0.1126 ± 0.006 g / g muestra seca (Mairami, et al., 2022) y en raquis de maíz de 0.2975 (Hoa, et al., 2015).

En este trabajo el resultado obtenido a escala piloto (bagazo al 86%) fue de 0.1095 ± 0.0028 g / g muestra seca cuyo valor es cercano a los demás reportes, pero 58% menor con respecto al valor de paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) y un 63% menor con respecto al raquis de maíz.

La literatura de igual manera reporta variaciones en la cantidad de fibra según el sustrato para *P. djamor*, cuando este se cultiva en paja de trigo el valor es de 0.2147 ± 0.09 g / g muestra seca (Nayak, et al., 2022), en bagazo de caña suplementado con 10% de paja de trigo fue 0.2265 ± 0.004 g / g muestra seca (Hasan, et al., 2015), en paja de arroz 0.1460 ± 0.0043 g / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de 0.0786 ± 0.0225 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019). Los resultados del presente proyecto indican que en la escala piloto el valor de fibra es de 0.1814 ± 0.0099 g / g muestra seca siendo 24% mejor que lo reportado para paja de arroz y 230% mejor que la mezcla de paja de trigo con musgo. Sin embargo, el valor de fibra fue 15% y 20% menor a lo reportado en paja de trigo y bagazo de caña-trigo.

Se entiende por fibra cruda todas aquellas sustancias orgánicas no nitrogenadas que no se disuelven tras una serie de hidrólisis ácidas y alcalinas sucesivas, en su mayoría este tipo de fibra se compone por celulosa (90%), lignina y hemicelulosa (10% entre

ambas) conformando la mayoría de la fibra insoluble (García, et al., 2008). Este tipo de fibra se ha comprobado que promueve el movimiento de la materia dentro del tracto digestivo además de que aumenta el volumen de las heces siendo beneficioso para aquellas personas que padecen de algún problema de estreñimiento (MayoClinic, 2022)

Actualmente el concepto de fibra cruda tiene poca significancia en la nutrición humana y se considera considerándose de mayor importancia la fibra dietaría, sin bien, no existe una relación directa entre ambos tipos de fibra se tienen estimaciones de que los valores de fibra dietaría son de 3 a 5 veces mayores que los valores de fibra cruda (Pak, 1997), se recomienda un consumo diario entre 25 y 30 g de fibra dietaría (University of California San Francisco, 2024) por lo cual, con los resultados obtenidos y considerando la menor estimación previamente mencionada se tiene que se requeriría de un consumo de 137.8 g de muestra seca de *P. djamor* y 228.3 g de muestra seca de *P. ostreatus*, lo cual haría inviable el uso de este alimento como única fuente de fibra para la dieta humana pero sería útil como suplemento en las dietas humanas.

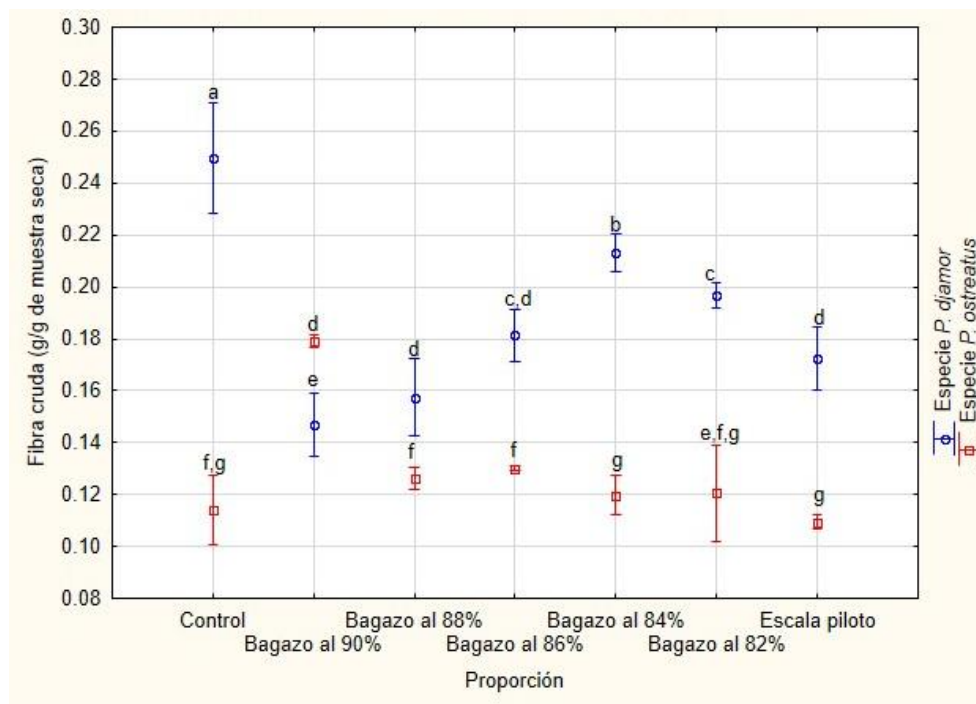


Fig. 27 Fibra (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.4 La cantidad de proteínas presentes en *P. djamor* es mayor que la cantidad reportada en la literatura para *P. ostreatus*

Los resultados correspondientes a la cantidad de proteínas de los cuerpos fructíferos para cada uno de los sustratos utilizados, así como para el control (100% rastrojo de maíz) y escala piloto (bagazo al 86%) se muestran en la Fig. 28. En este caso se puede apreciar que existe una diferencia entre los controles y las mezclas de sustratos en ambas especies, siendo que para *P. ostreatus* dicha diferencia es de al menos un 22% en bagazo al 82% y hasta un 38% en bagazo al 86%. Para *P. djamor* la mayor diferencia se encuentra entre el control y la mezcla de bagazo al 82%, la cual presentó hasta un 29% más de proteínas. Cuando comparamos las especies de *Pleurotus*, la mayor diferencia se encuentra entre las muestras de bagazo al 82%, en donde se observó una mayor cantidad de proteínas en *P. djamor* con una diferencia del 32%. Sin embargo, en la escala piloto no existe una diferencia significativa entre ellos.

Reportes en la literatura indican diferentes valores según el sustrato utilizado para el cultivo de hongos. En el caso de *P. ostreatus* cuando este se cultiva en paja

suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) se tiene un valor de 0.2554 ± 0.0427 g / g muestra seca (Shalahuddin, et al., 2019) en 50% tallo de palma con 50% paja de trigo 0.1914 ± 0.001 g / g muestra seca (Elkahan, et al., 2022), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) 0.2528 ± 0.0050 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019), en paja de chufa 0.2390 ± 0.016 g / g muestra seca (Mairami, et al., 2022) y en raquis de maíz 0.2970 g / g muestra seca (Hoa, et al., 2015). En el presente trabajo el resultado para la muestra a escala piloto fue de 0.3455 ± 0.0148 g / g muestra seca, encontrándose por encima de todos los reportes comparados por al menos un 18% en raquis de maíz y hasta un 84% con respecto al sustrato conformado por en 50% tallo de palma con 50% paja de trigo.

Para *P. djamor* los reportes indican que cuando este se cultiva en paja de trigo se tiene un valor de 0.2363 ± 0.0026 g / g muestra seca (Nayak, et al., 2022), en bagazo de caña suplementado con un 10% de paja de trigo 0.2350 ± 0.0162 (Hasan, et al., 2015), en paja de arroz 0.3550 ± 0.0178 g / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) 0.3098 ± 0.0435 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019). En el presente trabajo, se observó que la cantidad de proteínas es de 0.3518 ± 0.0062 g / g muestra seca siendo similar a la cantidad reportada en paja de arroz y en paja de trigo con musgo (60%:40%) y fue 49% mayor a lo reportado en sustratos como paja de trigo y bagazo de caña con un 10% de paja de trigo.

Los resultados de este trabajo y de la literatura indican que en la mayoría de los casos hay una mayor concentración de proteínas en los sustratos que han sido suplementados o mezclados a comparación de aquellos sustratos que solo están conformados por una materia prima, ya que al suplementar los sustratos conlleva a un incremento en la cantidad de carbono y nitrógeno (Elkanah, et al., 2022). Por lo tanto, la cantidad de proteínas presentes en el cuerpo fructífero depende del sustrato utilizado para el cultivo de los hongos (Garuba, et al., 2017) y además de afecta la calidad de dicha proteína (Hoa, et al., 2015).

Se ha comprobado además que los cuerpos fructíferos de los hongos del género *Pleurotus* cuentan con todos los aminoácidos esenciales y la mayoría de los no esenciales (a excepción de alanina, asparagina y glutamina), por tanto es considerado como un alimento funcional que enriquece la dieta humana (Jegadeesh, et al., 2018).

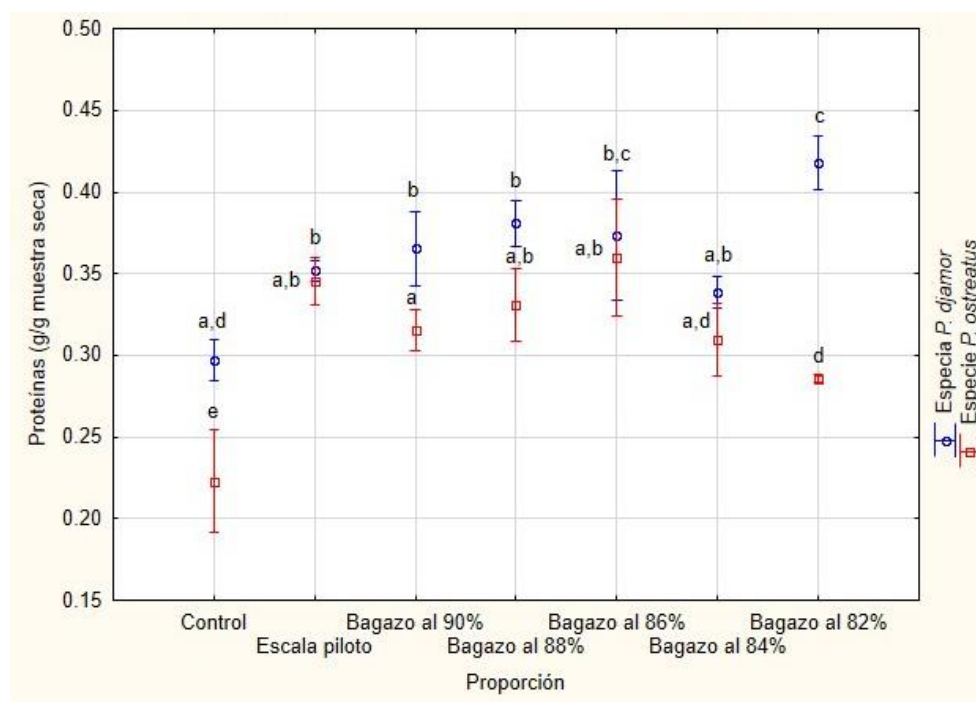


Fig. 28 Proteínas (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.5 La cantidad de lípidos en los cuerpos fructíferos varía según la proporción de sustrato utilizado y se encuentran dentro del rango reportado en la literatura

Los resultados correspondientes a la cantidad de lípidos de los cuerpos fructíferos de los hongos para cada uno de los sustratos, así como el control y la escala piloto se muestran en la Fig. 29. En este caso dependiendo de la proporción de sustrato utilizado, es la cantidad de lípidos que se tienen en el cuerpo fructífero, para *P. djamor* la muestra cultivada con bagazo al 84% tiene hasta 39 veces más lípidos en comparación con la muestra cultivada en bagazo al 82%, mientras que *P. ostreatus* cultivado en bagazo al 86% tiene hasta 43 veces más lípidos que la muestra en bagazo

al 90%. Sin embargo, en la escala piloto se puede apreciar que *P. ostreatus* tiene una media 1.83 veces mayor cantidad de lípidos con respecto de *P. djamor*.

Los valores reportados según el sustrato utilizado para el cultivo de hongos de *P. ostreatus* en paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) fue de 0.0643 ± 0.0427 g / g muestra seca (Shalahuddin, et al., 2019) en 50% tallo de palma con 50% paja de trigo de 0.0157 ± 0.002 g / g muestra seca (Elkanah, et al., 2022), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de 0.0127 ± 0.0008 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019), en paja de chufa de 0.0521 ± 0.0007 g / g muestra seca (Mairami, et al., 2022) y en raquis de maíz de 0.0267 g / g muestra seca (Hoa, et al., 2015). En el presente trabajo el resultado para la muestra a escala piloto fue de 0.0345 ± 0.0080 g / g muestra seca, encontrándose en el rango de valores reportados en la literatura.

Para *P. djamor* los reportes de la cantidad de lípidos presentes cuando este se cultiva en paja de trigo fueron de 0.0290 ± 0.0004 g / g muestra seca (Nayak, et al., 2022), en bagazo de caña suplementado con un 10% de paja de trigo de 0.0634 ± 0.0162 (Hasan, et al., 2015), en paja de arroz de 0.0172 ± 0.0003 g / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de 0.0155 ± 0.0028 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019). En el presente trabajo, el resultado a escala piloto mostró una cantidad de lípidos de 0.0186 ± 0.0055 g / g muestra seca y semejante a los rangos establecidos en la literatura.

Para el perfil de lípidos que se ha reportado para los hongos del género *Pleurotus* se encuentran el ácido linoleico conjugado, ácido palmítico, ácido oleico, ácido nonánico, ácido esteárico, ácido caprílico y ergosterol (Jegadeesh, et al., 2018). Entre los lípidos mencionados anteriormente se han comprobado diversas propiedades nutricionales y biológicas.

El ácido linoleico conjugado es el que se encuentra en mayor cantidad representando hasta un 65.29% del total (Ergonul, et al., 2013) se reporta que tiene efecto hipocolesterolémico, antiaterogénico, efecto inmunoestimulante, anticancerígeno, función antioxidante y participante en el reductor del peso corporal (Sanhueza, et al.,

2002). En promedio un adulto consume 16 g por día de ácido linoleico (Jandacek, 2017) por lo cual si se quisiera suplir esta cantidad se requerirían 860 g de muestra seca de *P. djamor* y 463.7 g de muestra se ca de *P. ostreatus*.

Mientras que otros como el ergosterol se ha demostrado que tiene actividad antidiabética para el tratamiento de diabetes tipo II (Xiong, et al., 2017), si bien no se tiene reportado la cantidad exacta necesaria de ergosterol para dicho tratamiento, el consumo de 3 g de muestra seca de hongo dividida en 3 dosis tras 3 meses de tratamiento conlleva a la reducción de la presión sistólica y diastólica en la sangre, de la glucosa plasmática en ayunas, de la hemoglobina A1c (HbA1c) sin tener un incremento en el nivel de creatina plasmática indicando que no afecta al sistema renal (Choudhury, et al., 2013).

Por lo tanto, el uso de estos hongos podría ser como un suplemento alimenticio para el tratamiento de la diabetes tipo II ya que el requerimiento para cumplir con la cantidad de consumo de ácido linoleico es muy alta.

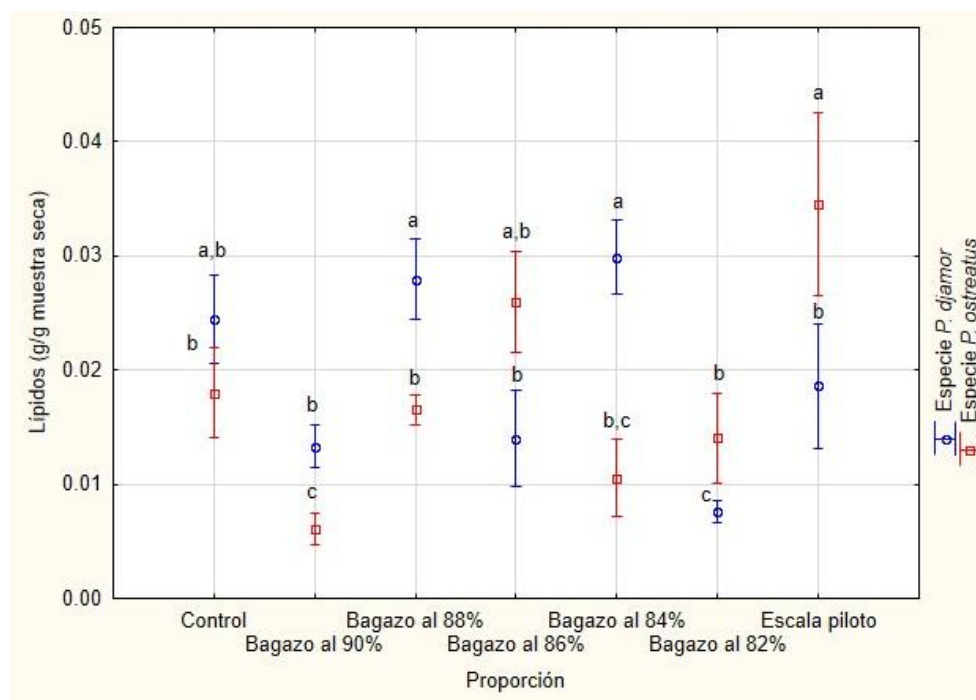


Fig. 29 Lípidos (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.6 La cantidad de cenizas presentes en los cuerpos fructíferos es menor en las proporciones de bagazo al 82%

Los resultados correspondientes a la cantidad de cenizas para ambas especies cultivadas en los diferentes sustratos, así como la muestra control y a escala piloto se presentan en la Fig. 30. En este caso solo se observó una diferencia significativa en la muestra *P. ostreatus* cultivada en rastrojo de maíz y en bagazo al 82%, y presentó un 28% más cantidad de minerales.

Reportes en la literatura indican diferentes valores según el sustrato utilizado para el cultivo de hongos. En el caso de *P. ostreatus* cuando este se cultiva en paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) se reportó un valor de 0.0876 ± 0.0029 g / g muestra seca (Shalahuddin, et al., 2019) en 50% tallo de palma con 50% paja de trigo de 0.0655 ± 0.0012 g / g muestra seca (Elkanh, et al., 2022), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de 0.0926 ± 0.0040 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019), en paja de chufa de 0.0825 ± 0.005 g / g muestra seca (Mairami, et al., 2022) y en raquis de maíz de 0.0710 g / g muestra seca (Hoa, et al., 2015).

En el presente trabajo para los cultivos a escala piloto se observó una cantidad de cenizas de 0.1041 ± 0.0127 g / g, cercano a los valores reportados para mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%), paja suplementada con fertilizante NPK (10 kg: 6 g) y paja de chufa, siendo además mayor a todas las demás referencias

En cuanto a *P. djamor* los reportes indican que la cantidad de cenizas cuando este se cultiva en paja de trigo fue de 0.0549 ± 0.0003 g / g muestra seca (Nayak, et al., 2022), en bagazo de caña suplementado con un 10% de paja de trigo de 0.0875 ± 0.0068 (Hasan, et al., 2015), en paja de arroz de 0.0590 ± 0.0005 g / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) de 0.0830 ± 0.0042 g / g muestra seca (Valenzuela, et al., 2019). En el presente trabajo la cantidad de cenizas fue de 0.0869 ± 0.0111 g / g muestra seca, valor que es similar a la mezcla de paja de trigo con musgo (60%:40%) y al de bagazo de caña suplementado con un 10% de paja de trigo, pero los valores obtenidos se encuentran por encima de la paja de arroz por un 58% y de la paja de trigo por un 60%.

La ceniza es el residuo inorgánico que se recupera tras la incineración de la materia orgánica, dicha ceniza está compuesta por minerales los cuales varían según la matriz orgánica que se esté analizando (Pomeranz & Meloan, 1994). Para los hongos del género *Pleurotus* se ha reportado que contiene diferentes minerales siendo rico en potasio, calcio y fósforo además de tener otros como cobre, hierro, magnesio, manganeso, zinc, selenio. De igual manera la composición mineral de los cuerpos fructíferos depende del sustrato utilizado, así como también de la conductividad eléctrica del sustrato ya que conforme mayor sea, lo será también la absorción del cuerpo fructífero (Hoa, et al., 2015).

En cuanto a contenido de potasio se tiene para *P. ostreatus* valores entre 19.50 mg/g – 20.39 mg/g de muestra seca y 39.68 – 42.18 mg/g de muestra seca y para magnesio de 1.27 – 1.75 mg/g de muestra seca y 1.57 – 2.50 mg/g de muestra seca (Jin, et al., 2018); (Sales, et al., 2009). El consumo diario recomendado de potasio es de 3,400 mg para hombres y 2,600 mg para mujeres (National Institutes of Health, 2019) lo cual se podría obtener con un consumo de 195 y 150 g de muestra seca de *P. djamon* y 165 y 125 g de muestra seca de *P. ostreatus*. En cuanto a magnesio se recomienda un consumo diario de 400 mg para hombres y 310 mg para mujeres (National Institutes of Health, 2020), si esta cantidad se quisiera completar con el consumo de hongos sería necesario consumir 230 y 172 g de muestra seca de *P. djamon* y 192 y 144 g de muestra seca de *P. ostreatus*, por lo cual no sería una buena alternativa para suplir toda la necesidad de estos minerales pero si como un suplemento que los contenga.

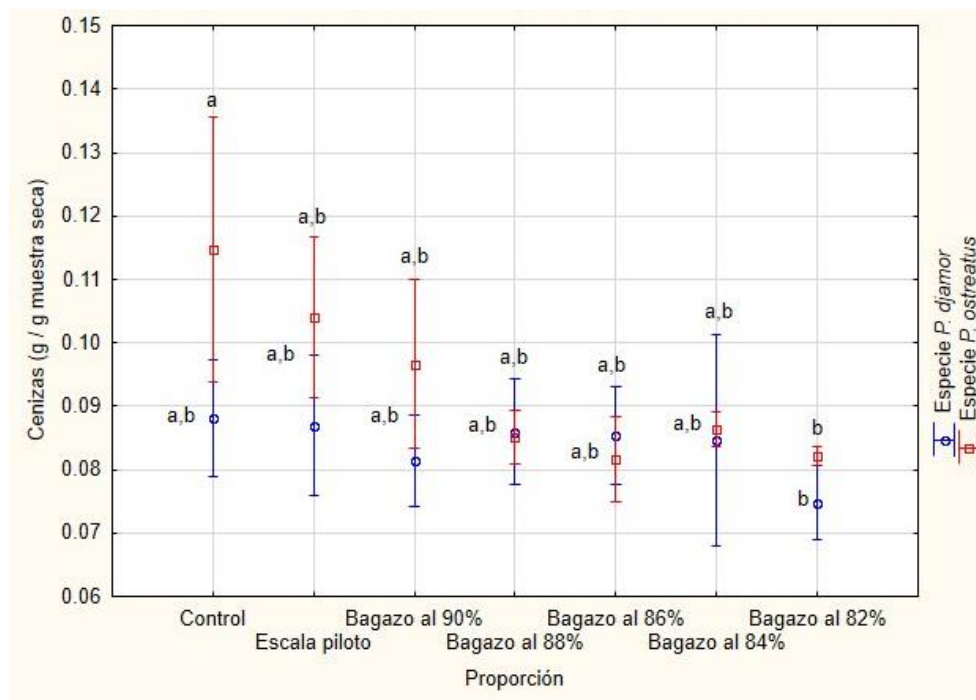


Fig. 30 Cenizas (g / g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.7 El contenido fenólico total disminuye conforme se aumenta la cantidad de rastrojo de maíz en el sustrato.

los resultados correspondientes al contenido total fenólico para cada especie de hongo cultivado en sus diferentes proporciones de sustrato, en la escala piloto y en su correspondiente control se muestran en la Fig. 31. Se puede apreciar que la muestra de *P. ostreatus* cultivada en bagazo de malta al 90% es la que mayor cantidad de antioxidantes contiene en su matriz, al compararlo con *P. djamon* en esa misma proporción este último mostró un 23% menos de antioxidantes.

Al comparar ambas muestras con sus respectivos controles se tiene que para *P. ostreatus* y *P. djamon* en bagazo al 90% tuvo un valor 1.77 y 1.66 veces mayor que el control, respectivamente.

Así mismo se observó que para *P. ostreatus* en escala laboratorio hay una tendencia a disminuir en la cantidad de antioxidantes conforme son cultivados con mayor proporción de rastrojo de maíz en la mezcla. Se observó que las muestras de bagazo

al 86% (y por lo tanto 14% de rastrojo de maíz) tienen un valor similar a las muestras control.

Para *P. djamor* se observó que en escala laboratorio no existe una diferencia de la cantidad de antioxidantes presentes en aquellos hongos cultivados en bagazo al 90%, 88% ni 86%. Se encontró que si existe diferencia significativa en cantidad de compuestos fenólicos cuando se utilizaron para el cultivo del hongo mezclas de bagazo al 84% y 82% y se observó la misma tendencia de disminuir la cantidad del contenido total fenólico conforme se aumenta la cantidad de rastrojo de maíz.

En cuanto a la muestra cultivada a escala piloto esta también presenta una diferencia en contenido antioxidante con respecto del cultivo a escala laboratorio (bagazo al 86%), observándose que para la escala piloto hay una reducción de la cantidad de antioxidantes en un 28% para *P. ostreatus* y en 27% para *P. djamor* esto sugiere que el diseño del reactor puede afectar al contenido total fenólico.

Para *P. ostreatus* se ha reportado un contenido de antioxidantes, cuando se cultiva en raquis de maíz de 1.18 ± 0.06 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Jin, et al., 2018), en tronco de álamo de 4.83 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Valiente, et al., 2016) y en trigo de 7.93 ± 1.46 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Torres, et al., 2023). En el presente trabajo el valor observado de antioxidantes a escala piloto fue de 2.21 ± 0.15 mg eq. ác. gálico / g muestra seca, siendo este valor de antioxidantes 2 veces mayor a lo reportado en raquis de maíz pero 2.19 y 3.58 veces menor al tronco de álamo y trigo, respectivamente.

Para *P. djamor* al comparar con la literatura se reportó que cuando este se crece en paja de arroz los valores fueron de 6.750 ± 0.23 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Jegadeesh, et al., 2018), en paja de 0.95 ± 0.02 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Oropeza, et al., 2017) y en sorgo de 27 ± 4.89 mg eq. ác. gálico / g muestra seca (Babu, et al., 2014). En el presente trabajo el resultado obtenido fue de 2.17 ± 0.18 mg eq. ác. gálico / g muestra seca siendo 2.28 veces mayor a lo reportado en paja, sin

embargo, el valor es 3.11 y 12.44 veces menor a lo reportado en paja de arroz y sorgo, respectivamente.

Los hongos comestibles tienen propiedades antioxidantes y se consideran como alimentos funcionales, para los hongos del género *Pleurotus* se ha demostrado que la adición de extractos de antioxidantes en muestras de carne reduce la oxidación de los lípidos (Torres, et al., 2023). Estos hongos tienen además una alta cantidad de compuestos fenólicos, flavonoides y alcaloides siendo una fuente rica en antioxidantes por lo cual tienen un potencial para el desarrollo de terapias asociadas al estrés oxidativo (Effiong, et al., 2024). Así mismo los compuestos fenólicos son los principales antioxidantes encontrados en los cuerpos fructíferos de dichos hongos (Sulistiany, et al., 2016).

Los arándanos son una de las principales fuentes de antioxidantes en la dieta humana, se recomienda un consumo diario de 178 gramos (Berman, 2023). Estudios indican que este fruto contiene 696.46 mg eq. ác. gálico/ 100 g muestra fresca (Cataño, et al., 2022), por lo tanto, el consumo diario recomendado equivaldría a 1,239 mg eq. ác. gálico que si se decidiera suplir únicamente con hongos se requeriría una cantidad de 571 g de muestra seca de *P. djamor* y 560 g de muestra seca de *P. ostreatus*, por lo tanto, no sería viable utilizar este alimento para suplir la cantidad necesaria de antioxidantes en la dieta.

Los resultados obtenidos y la comparación con lo reportado en la literatura parecen indicar que existe una relación entre el sustrato utilizado con el contenido fenólico total, ya que cuando se utilizan sustratos que no son un residuo agroindustrial (sorgo y trigo) los resultados son mayores, así mismo en el presente trabajo se pudo apreciar que al incrementar la cantidad de rastrojo de maíz en el sustrato conlleva a una disminución en el contenido fenólico total.

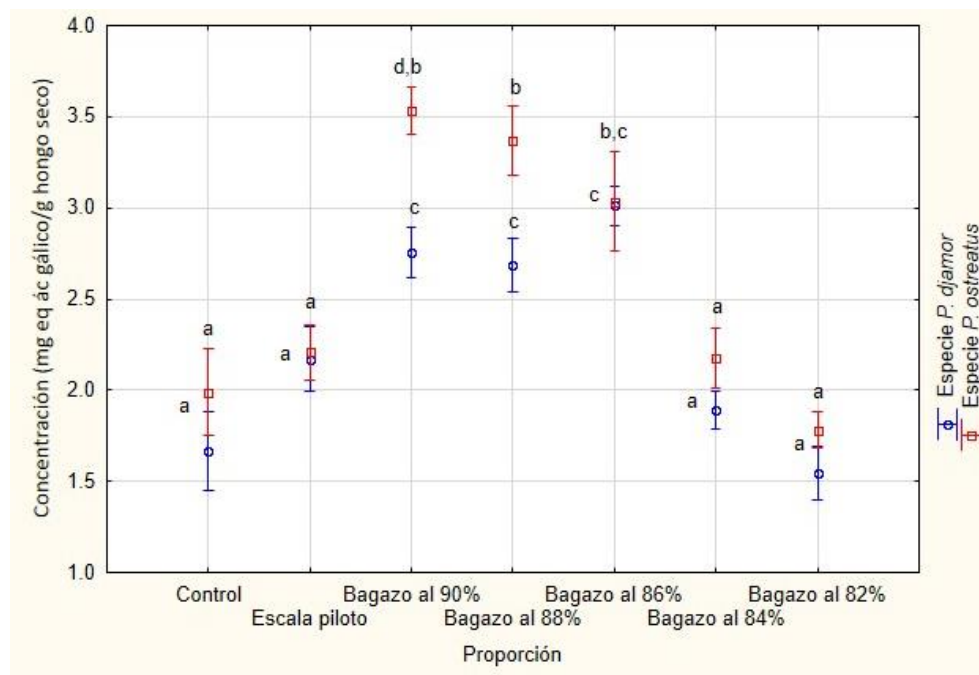


Fig. 31 Contenido fenólico total (mg eq ácido gálico/g muestra seca) para cada una de las proporciones utilizadas, rastrojo de maíz y escala piloto

7.3.8 El sustrato tiene un efecto directo en los nutrientes presentes en los cuerpos fructíferos para los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor*

Los resultados presentados en los apartados anteriores indican que existe una relación entre la mezcla utilizada en el sustrato para el crecimiento de los hongos del género *Pleurotus*, en este caso la mezcla de bagazo al 86% fue la que mayor media tuvo para proteínas, además de presentar una de las menores cantidades de carbohidratos y mantener valores de fibra, antioxidantes, lípidos y cenizas similares a las demás muestras, así mismo los resultados en los parámetros productivos indicaron que esta mezcla fue la de mayor media de la TP por lo cual se tomó la decisión de usar esta mezcla para el escalamiento ascendente.

Si bien, este hongo tiene propiedades nutrimentales atractivas, estas no son lo suficientes para suplir algún aspecto por completo en una dieta, sino que más bien pueden funcionar como un buen suplemento alimenticio además de que se puede

enfocar su consumo en compuestos como el ergosterol que con bajas cantidades de consumo se pueden lograr beneficios a la salud del humano.

Así mismo los resultados del presente trabajo y los reportados en la literatura parecen indicar que hay una tendencia de una mayor cantidad de proteínas presentes en el cuerpo fructífero, mientras que la cantidad de carbohidratos disminuye, sin embargo es conveniente realizar análisis del sustrato utilizado para determinar la relación C/N ya que este parámetro está comprobado que afecta la productividad y la cantidad de proteínas presentes en los cuerpos fructíferos de *P. ostreatus* teniendo un valor óptimo entre 38 y 48. Así mismo, al suplementar el sustrato con una fuente de nitrógeno es importante considerar la naturaleza orgánica o inorgánica, para mejorar la calidad de las proteínas obtenidas (Ruilova, et al., 2017).

Si bien, los resultados de lípidos se encontraron dentro de los parámetros reportados en la literatura sería importante realizar este mismo análisis en la materia prima para corroborar si es que afecta de alguna forma la síntesis de estos.

La cantidad de contenido fenólico total tuvo variación según el sustrato utilizado, se observó que los hongos cultivados en el sustrato control tuvieron la menor cantidad en comparación con los hongos cultivados en las mezclas, sin embargo, conforme se incrementó la cantidad de rastrojo de maíz el valor de antioxidantes disminuyó hasta llegar a tener el mismo que el control para las mezclas de bagazo al 84% y 82%, por esta razón para este parámetro sería importante realizar la determinación de contenido fenólico total en el sustrato para corroborar que este se ve afectado por el sustrato utilizado durante el cultivo del hongo.

Se observó una disminución del contenido fenólico al realizar el escalamiento, lo que sugiere que el diseño del reactor puede tener un efecto en este parámetro, por esta razón podrían proponer diferentes conformaciones y estudiarse diferentes fenómenos de transferencia de masa y momento en el mismo, para corroborar que la cantidad de compuestos fenólicos totales están relacionados con el diseño del reactor.

Por último, la conductividad eléctrica es otro parámetro que se podría medir en el sustrato utilizado ya que lo reportado por Hoa, et al. (2015) indica que este parámetro afecta de manera directa la absorción de los minerales por los cuerpos fructíferos, además sería importante determinar los minerales presentes tanto en los sustratos como en los cuerpos fructíferos.

7.4 Los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH tienen actividad de amilasas, celulasas, lacasas y xilanasas

Los resultados correspondientes a los análisis de proteínas totales de los extractos crudos enzimáticos recuperados de las muestras de RRH, así como la actividad enzimática específica de cada uno de ellos para amilasas, celulasas, lacasas y xilanasas se presentan en la Tabla 10. En este punto cabe resaltar que al ser extractos crudos no han sido sometidos a procesos de purificación.

Tabla 10 Actividad enzimática de los extractos crudos enzimáticos recuperados del residuo remanente de los hongos del género Pleurotus cultivados en las diferentes proporciones de sustratos, rastrojo de maíz (control) y cultivo a escala piloto

Especie	Proporción	Concentración proteínas (mg/mL)	Actividad enzimática amilasas (UI/g RRH)	Actividad enzimática celulasas (UI/g RRH)	Actividad enzimática xilanasas (UI/g RRH)	Actividad enzimática específica lacasas (UI/L)
<i>P. djamor</i>	Control	0.1184 ± 0.0032 ^{a,b}	0.0765 ± 0.0103 ^{a,b}	0.1104 ± 0.0111 ^b	0.1796 ± 0.0081 ^d	16,769 ± 47 ^b
	Bagazo 90%	0.1393 ± 0.0160 ^c	0.1012 ± 0.0063 ^c	0.1144 ± 0.0037 ^b	0.1910 ± 0.0128 ^d	18,114 ± 1,151 ^{c,b}
	Bagazo 88%	0.1291 ± 0.0140 ^c	0.0873 ± 0.0072 ^{a,b}	0.1324 ± 0.0101 ^{c,d}	0.1296 ± 0.0118 ^b	29,334 ± 800 ^e
	Bagazo 86%	0.1296 ± 0.0044 ^c	0.1307 ± 0.0172 ^{d,e}	0.0790 ± 0.0043 ^a	0.2673 ± 0.0260 ^e	19,803 ± 348 ^c
	Bagazo 84%	0.1281 ± 0.0043 ^c	0.1123 ± 0.0100 ^{c,d}	0.1094 ± 0.0011 ^b	0.1868 ± 0.0104 ^d	20,726 ± 1,176 ^c

	Bagazo 82%	0.1181 ± 0.0033 ^{a,b}	0.1127 ± 0.0293 ^{b,c,d}	0.1100 ± 0.0096 ^b	0.1441 ± 0.0161 ^{b,c}	16,567 ± 907 ^b
	Escala piloto	0.1268 ± 0.0097 ^{a,b,c}	0.1564 ± 0.0096 ^{e,f}	0.1328 ± 0.0098 ^{c,d}	0.1927 ± 0.0176 ^d	16,615 ± 1,247 ^b
<i>P. ostreatus</i>	Control	0.1195 ± 0.0012 ^b	0.0689 ± 0.0141 ^a	0.0846 ± 0.0059 ^a	0.1289 ± 0.0109 ^b	19,481 ± 586 ^c
	Bagazo 90%	0.1143 ± 0.0017 ^a	0.1402 ± 0.0077 ^{e,d}	0.1574 ± 0.0096 ^e	0.1090 ± 0.0037 ^a	14,786 ± 1,321 ^{a,b}
	Bagazo 88%	0.1167 ± 0.0004 ^a	0.1049 ± 0.0060 ^c	0.1086 ± 0.0091 ^b	0.1070 ± 0.0026 ^a	18,846 ± 220 ^c
	Bagazo 86%	0.1167 ± 0.0004 ^a	0.1505 ± 0.0052 ^e	0.1290 ± 0.0025 ^{c,d}	0.1891 ± 0.0094 ^d	26,848 ± 1,499 ^d
	Bagazo 84%	0.1232 ± 0.0040 ^{b,c}	0.0904 ± 0.0027 ^b	0.1240 ± 0.0013 ^c	0.1136 ± 0.0037 ^a	19,344 ± 1,476 ^d
	Bagazo 82%	0.1183 ± 0.0028 ^{a,b}	0.1633 ± 0.0046 ^f	0.1361 ± 0.0070 ^d	0.1542 ± 0.0090 ^c	26,811 ± 940
	Escala piloto	0.1294 ± 0.0081 ^{b,c}	0.1192 ± 0.0132 ^{c,d}	0.0741 ± 0.0075 ^a	0.2009 ± 0.0084 ^d	12,970 ± 740 ^a

7.4.1 La concentración de proteínas no se ve afectada al momento de realizar el cambio de escala, presentando valores similares a los de la muestra control, pero dos veces por debajo a lo reportado en la literatura.

Los resultados correspondientes a la concentración de proteínas de los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH de cada uno de los sustratos a escala laboratorio, así como el control y la muestra a escala piloto se presentan en la Fig. 32. Para el caso de las muestras de *P. ostreatus* se pudo apreciar que las proporciones de bagazo de malta al 90%, 88% y 86% se encuentran por debajo de los valores de la muestra control por al menos un 6%, mientras que las demás muestras tienen valores similares, en este caso se apreció que no hay un efecto negativo debido al escalamiento.

Para *P. djamor* se observó que la mayoría de las muestras a escala laboratorio (a excepción de la de bagazo al 82%) tienen una mayor concentración de proteínas con respecto al control presentando valores con al menos un 9% más de concentración de

proteínas, similar al caso anterior el cambio de escala no tiene un efecto negativo en la cantidad de proteínas recuperadas del RRH.

Reportes en la literatura indican que las concentraciones de proteína son 0.288 ± 0.047 mg/g en buffer de citrato de sodio 50 mM pH 4.5 (Lim, et al., 2013) y en agua de la llave de 0.1954 mg/g (Shan & Hassan, 2022). En el presente trabajo los valores obtenidos a escala piloto fueron de 0.1268 ± 0.0097 mg/mL y 0.1294 ± 0.0081 mg/mL siendo 2.27 veces menor a lo obtenido en buffer de citrato de sodio 50 mM pH 4.5 y 1.54 veces menor a lo obtenido en agua de la llave, lo cual podría tener una implicación en la actividad enzimática específica.

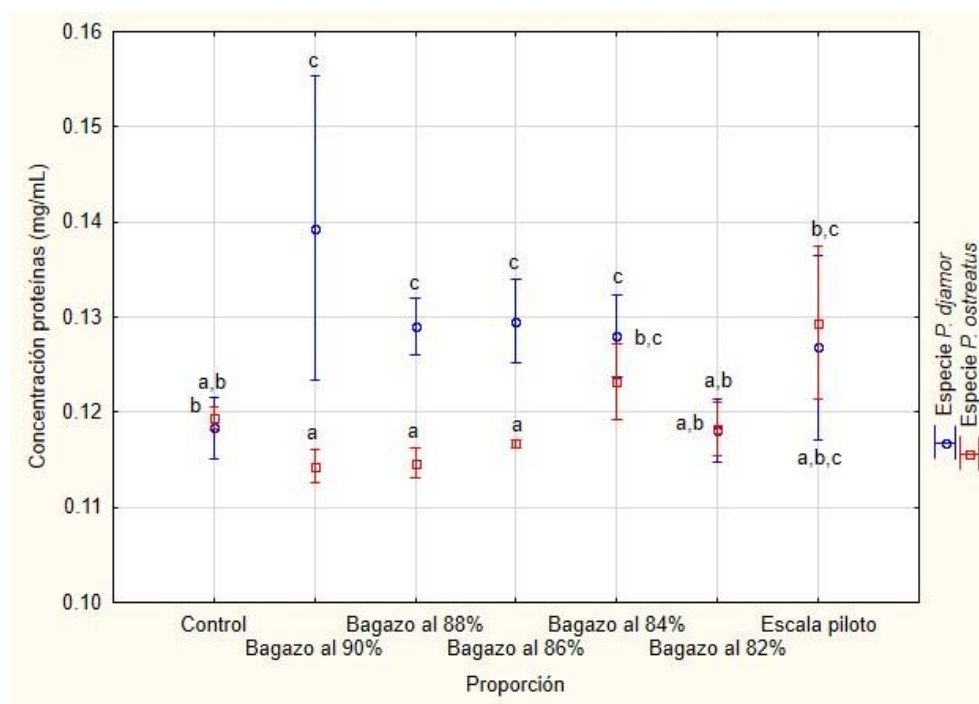


Fig. 32 Cantidad de proteínas (mg / g de RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato

7.4.2 La actividad enzimática de amilasas varía según la proporción de bagazo utilizada además de que presenta cambios al momento de realizar el escalamiento

Los resultados obtenidos para la actividad enzimática de amilasas de cada una de las muestras cultivadas en sus respectivos sustratos a escala laboratorio, así como la escala piloto y sus controles se muestran en la Fig. 33.

Para *P. ostreatus* se pudo apreciar que las muestras que corresponden a la escala laboratorio y piloto tienen valores de AE por encima de la muestra control siendo la mayor la que corresponde a bagazo al 82% (con la mayor actividad de todas las muestras). La AE de amilasa tuvo un valor 2.37 veces mayor, mientras que el de la escala piloto es 1.73 veces mayor que el control. Entre escalas laboratorio y piloto se observó una disminución de la AE de amilasa en un 21% a escala piloto.

Para *P. djamor* se observó una tendencia similar en donde la mayoría de las muestras a escala laboratorio (a excepción de bagazo al 88% y 82%) y piloto mostraron tener un valor mayor de actividad enzimática en comparación del control, en este caso la mayor media de AE de amilasa fue a escala piloto con un valor 2.05 veces por encima del control, así mismo no se observó una diferencia significativa entre la muestra de bagazo al 86% y a escala piloto.

Los reportes en la literatura indican diferentes valores de actividad enzimática de amilasas en diversos buffers y sustratos, habiendo casos en los que no se detecta la presencia de dichas enzimas (Vats, et al., 2022), en el caso de citrato de sodio 50 mM pH 4.5 se tiene una actividad de 2.8 ± 0.21 U/g (Lim, et al., 2013), en buffer alcalino para *P. djamor* 1 U/g y *P. ostreatus* 0.74 U/g (Afsar, et al., 2024) y 0.042 U/mL en *Pleurotus florida* cultivado en paja de arroz (Devi, et al., 2020).

En el presente trabajo los valores obtenidos a escala piloto fueron de 0.1564 ± 0.0096 U/g RRH y 0.1192 ± 0.0132 U/g RRH en *P. djamor* y *P. ostreatus*, respectivamente encontrándose hasta 23 veces por debajo a lo reportado en citrato de sodio 50mM pH 4.5. y 8.4 veces por debajo de lo obtenido en buffer alcalino, sin embargo, ambos

autores no indican la procedencia del RRH del cual se extraen las enzimas, solamente mencionan que fueron recuperados de granjas de hongos. En cuanto a la comparación con los resultados presentados en paja de arroz el valor obtenido en el presente trabajo fue hasta 3.7 veces mayor, si bien, la especie de hongo es diferente corresponde aún al género *Pleurotus*.

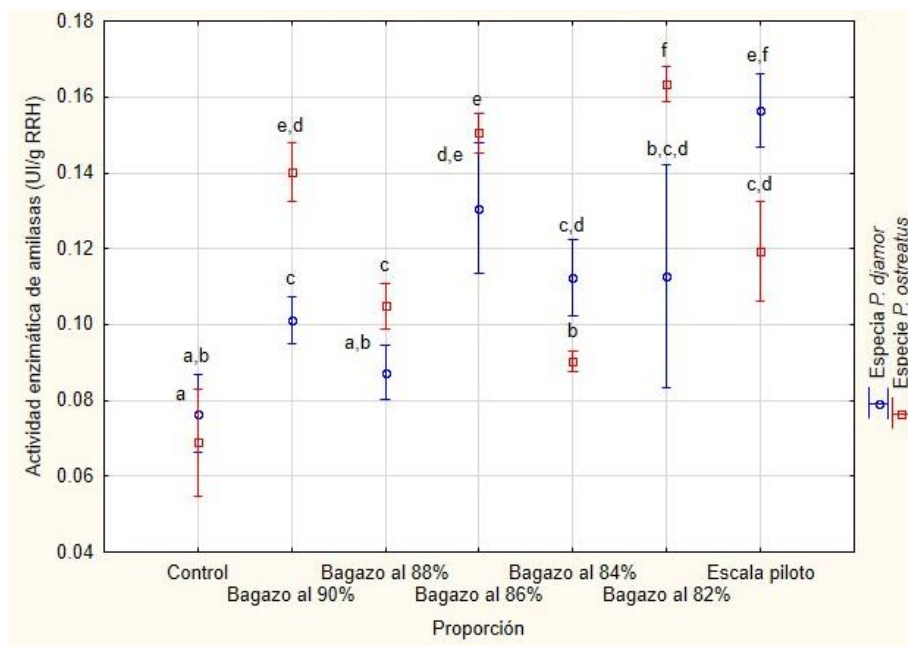


Fig. 33 Actividad enzimática de amilasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato

7.4.3 La actividad enzimática de las celulasas presenta una variación para las proporciones utilizadas a escala laboratorio, siendo mayor para el hongo *P. ostreatus*, además de tener un cambio de dicha actividad en ambos hongos al momento de realizar el escalamiento.

los resultados correspondientes a la actividad enzimática de celulasas en los extractos enzimáticos crudos recuperados de cada una de las muestras del presente proyecto se muestran en la Fig. 34. Para *P. ostreatus* se pudo observar que las muestras cultivadas a escala laboratorio tienen valores de AE de celulasas mayores al control, siendo la muestra de bagazo al 90% la que presentó mayor actividad con un valor 1.86 veces más con respecto al control. La muestra cultivada a escala piloto presentó un

43% menos de AE de celulasas con respecto a la misma proporción a escala laboratorio (bagazo al 86%) y cuyo valor fue igual al de la muestra control. Para *P. djamor* las muestras cultivadas en bagazo al 88% y en escala piloto, fueron las que presentaron la mayor AE con un valor 1.2 veces mayor al control.

Los reportes en la literatura indican que los extractos enzimáticos con actividad específica de celulasas tienen valores de 0.114 U/g a 0.179 U/g para *P. ostreatus* cultivado en 95% aserrín, 3% paja de arroz, 1% CaCO₃ y 1% CaSO₄ (Qorri, et al., 2022), en buffer alcalino para *P. djamor* de 0.586 U/g y *P. ostreatus* 0.42 U/g (Afsar, et al., 2024) y en buffer de citrato de sodio 50 mM pH 4.5 una actividad de 2.18 ± 0.213 U/g (Lim, et al., 2013).

En el presente trabajo los resultados para las muestras a escala piloto fueron de 0.1328 ± 0.0098 UI/g RRH y 0.0741 ± 0.0075 UI/g RRH para *P. djamor* y *P. ostreatus* respectivamente, esto representa un valor en *P. djamor* similar y 1.98 veces menor para *P. ostreatus* a lo obtenido en *P. ostreatus* cultivado en 95% aserrín, 3% paja de arroz, 1% CaCO₃ y 1% CaSO₄, sin embargo, ambas muestras se encuentran 4.41 y 5.67 veces respectivamente por debajo a lo reportado en buffer alcalino y 16.41 y 29.42 veces por debajo a lo reportado en buffer de citrato de sodio 50 mM pH 4.5.

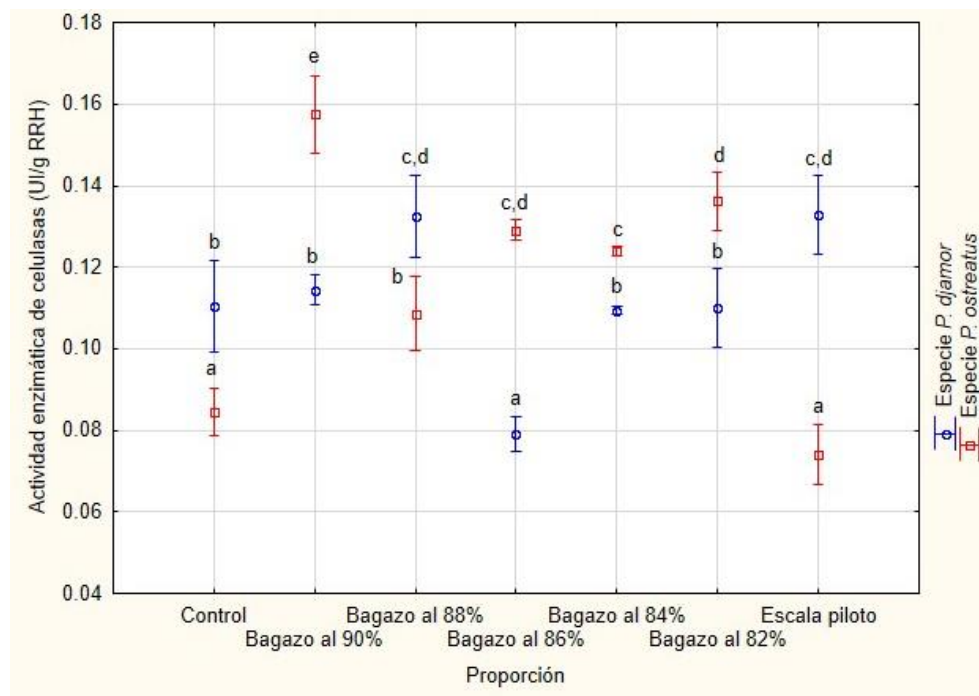


Fig. 34 Actividad enzimática específica de celulasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato

7.4.4 La actividad de lacasas fue mayor a escala laboratorio, teniendo una reducción de hasta 50% a escala piloto.

los resultados correspondientes a la actividad enzimática específica para lacasas de cada una de las mezclas de sustrato empleadas para el crecimiento de ambos hongos, así como los controles y la muestra a escala piloto se muestran en la Fig. 35. Para *P. ostreatus* la muestra cultivada en bagazo al 86% es la que mayor actividad presentó, con un valor 1.38 veces mayor en comparación con el control, sin embargo, la muestra a escala piloto tuvo un valor 2.07 veces menor. En cuanto a *P. djamor* se observa una tendencia semejante, la muestra cultivada en bagazo al 86% es una de las que mayor actividad presentó, y fue 1.18 veces mayor a la muestra control y a la muestra a escala piloto. Se sugiere que el cambio de escala tiene un efecto negativo en la AE de las enzimas recuperadas para ello será necesario en lo subsecuente mejorar el diseño.

Los reportes en la literatura indican actividades enzimáticas específicas de 34,240 UI/L en medio de cultivo con glucosa como única fuente de carbono y cobre como inductor

de lacasas (Hernández, et al., 2017) este resultado indica entonces que las lacasas son enzimas constitutivas en el hongo *Pleurotus ostreatus*. En nuestro trabajo al utilizar un residuo agroindustrial como el bagazo de malta se tendría una reducción en el costo de la producción de este tipo de enzimas, los valores que obtuvimos para *P. ostreatus* ($12,970 \pm 740$ UI/L) y *P. djamor* ($16,615 \pm 1,247$ UI/L) a escala piloto fueron un 62% y 51% menores a lo reportado, respectivamente. Por ello, sería conveniente realizar el análisis económico para corroborar la factibilidad de recuperar los extractos enzimáticos crudos de un residuo agroindustrial en comparación de utilizar medios definidos con glucosa y cobre.

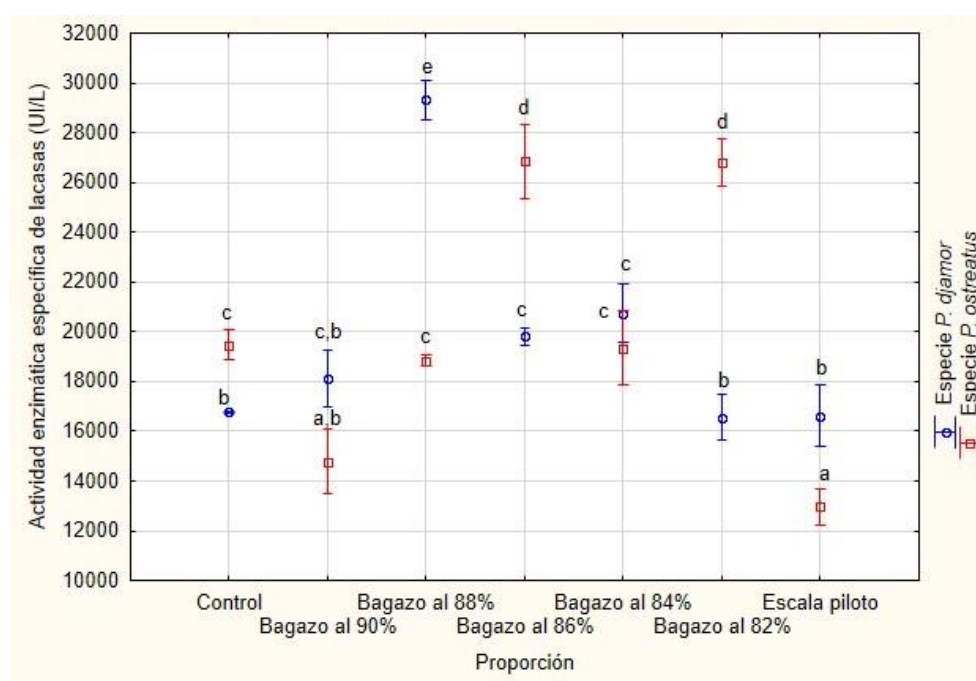


Fig. 35 Actividad enzimática específica de lacasas (UI/L) para cada especie de hongo y proporción de sustrato

7.4.5 La mayor actividad de xilanasas de *P. djamor* fue a escala laboratorio con respecto de *P. ostreatus* no se presenta diferencia en actividad enzimática entre la escala laboratorio y piloto.

Los resultados correspondientes a la actividad enzimática correspondiente a las xilanasas para cada especie de hongo en su respectiva proporción de sustrato, así como las muestras control y la escala piloto se muestran en la Fig. 36. Para *P. ostreatus*

se pudo apreciar que las muestras con la mayor actividad enzimática corresponden a bagazo al 86% y escala piloto. En este caso el cambio de escala no afectó a la producción de dicha enzima, el valor obtenido es 1.56 veces mayor a comparación de su respectivo control. Para *P. djamor* se puede apreciar que la muestra con mayor actividad fue la que se cultivó con bagazo al 86%, y cuyo valor de AE fue de 1.49 veces mayor que la muestra control, al momento de realizar el escalamiento la actividad enzimática se redujo en un 28%.

Los reportes en la literatura indican que esta enzima no siempre está presente en los extractos crudos enzimáticos, que son recuperados del RRH de granjas de hongos (Vats, et al., 2022) o de ensilaje de maíz (Agustinho, et al., 2021), sin embargo, se ha reportado AE de xilanasas para el cultivo de *P. pulmonarius* en residuo de palma post extracción de aceite con un valor de actividad de 2.3 U/g (Yunan, et al., 2021) y 58 ± 9.3 U/g en citrato de sodio 50 mM pH 4.5 (Vats, et al., 2022).

Los valores obtenidos en este proyecto a escala piloto fueron 0.1927 ± 0.0176 U/g RRH y 0.2009 ± 0.0084 U/g RRH para *P. djamor* y *P. ostreatus* respectivamente, y cuyo valor es 11.45 veces menor a lo reportado en *P. pulmonarius* y 288 veces por debajo al resultado obtenido en la muestra de citrato de sodio 50 mM pH 4.5. Esto se puede deber principalmente a la disponibilidad de xilano en el sustrato en el cual se está creciendo el hongo, así como también por la especie. Sin embargo, sería ideal realizar la determinación y disponibilidad de dicha fuente de carbono y en la medida de lo posible variar su cantidad para poder analizar como es que este afecta al crecimiento de los hongos del género *Pleurotus*.

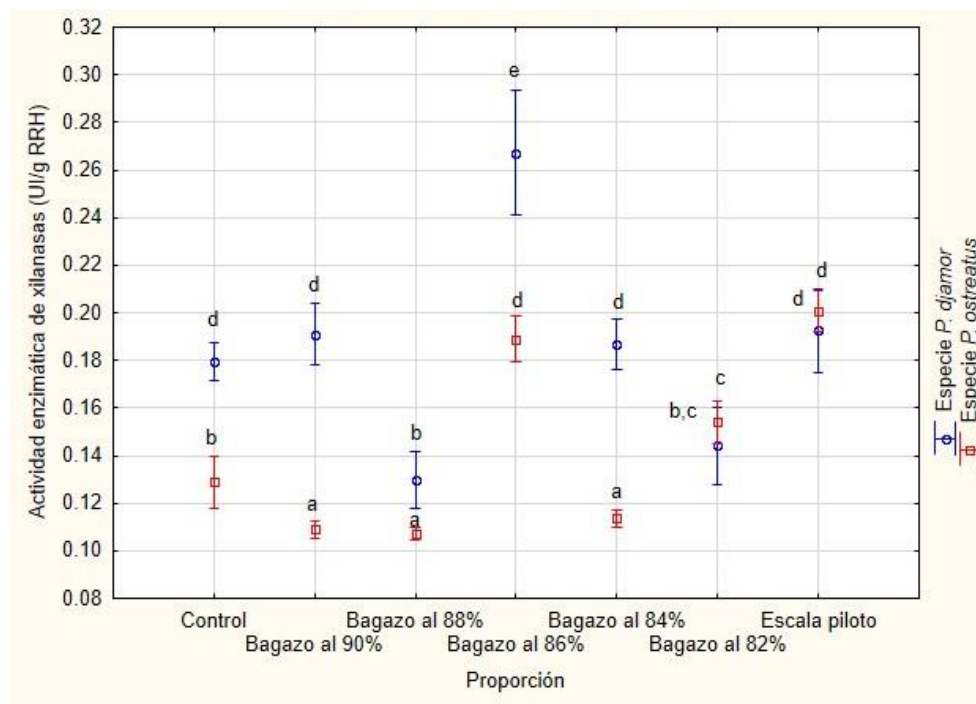


Fig. 36 Actividad enzimática específica de xilanasas (UI/g RRH) para cada especie de hongo y proporción de sustrato

7.4.6 El sustrato tiene un efecto en la actividad de las enzimas, así como la edad del RRH.

Los resultados presentados en este apartado indican que hay diferencia de la actividad de amilasas cuando el sustrato se compone únicamente de rastrojo de maíz con respecto de las mezclas con bagazo de malta, siendo este último el de mayor actividad. Durante el proceso de maceración el almidón presente en la malta se transforma hacia azúcares fermentables y no fermentables (Kenechukwu, 2019), sin embargo, este proceso no realiza la sacarificación del 100% del almidón presente en la matriz, ya que depende del tiempo de maceración (usualmente 1 hora), temperatura y agitación. Se ha reportado la transformación de azúcares de hasta un 77% (Van Donkelaar, et al., 2016), así mismo hay reportes que indican que no en todos los RRH de hongo se encuentra la actividad de esta enzima (Vats, et al., 2022). Por esta razón se puede suponer que la presencia de almidón es la que induce la producción de dichas enzimas por ambos hongos, sería pertinente entonces para futuros trabajos determinar la

cantidad de almidón en el sustrato para analizar como es que este afecta a la producción y actividad de dicha enzima.

Otro parámetro que afecta la producción de enzimas es la relación C/N, en el caso de las lacasas se tiene reportado que un incremento en dicho parámetro conlleva a un decremento en la producción de dicha enzima, así mismo, la fuente de nitrógeno utilizada en caso de suplementar el sustrato también tiene un efecto en la producción y actividad de dichas enzimas (D'Agostini, et al., 2011). Además el momento en el que se recuperan las enzimas conlleva a una diferente actividad, en el caso de las lacasas la mayor actividad se observa cuando el sustrato ha sido colonizado un 50% y conforme pasan los días va disminuyendo (Economou, et al., 2020), en nuestro trabajo se observó que la mayor AE fue para esta enzima con respecto de las 4 analizadas, ya que al ser un hongo de podredumbre blanca su consorcio enzimático es más afín a aprovechar fuentes de carbono como la lignina en lugar de la celulosa o hemicelulosa (Qorri, et al., 2022). En este punto sería entonces importante realizar la medición de la relación C/N del RRH así como analizar la recuperación de enzimas en diferentes momentos del desarrollo del hongo, desde la siembra hasta el último periodo de fructificación.

Similar al caso de las amilasas reportes en la literatura indican que la actividad de las xilanasas no se encuentra siempre en el RRH, sino que depende del sustrato en el que el hongo haya crecido, así mismo se tienen reportes en la literatura que indican que la actividad de esta enzima varía conforme la edad del RRH, siendo mayor su valor a los 25 días, disminuyendo hasta en un 80% en el día 60 (Singh, et al., 2012). Similar al caso de las lacasas sería pertinente analizar la actividad enzimática a lo largo del tiempo desde la siembra del hongo hasta la última fructificación.

Así mismo otro parámetro que podría ser de utilidad para las enzimas es la cantidad de lignina, celulosa y hemicelulosa presente en el sustrato, de esta manera se podría corroborar la relación entre la producción de enzimas con respecto a la disponibilidad del sustrato específico. Otro punto importante para considerar para futuros trabajos es el análisis de enzimas que estén ligadas a la degradación de la lignina ya que según

lo reportado en la literatura se esperaría que estuvieran en una concentración atractiva para su recuperación y aprovechamiento en diferentes aplicaciones biotecnológicas.

7.5 La decoloración de azul de bromofenol y rojo Congo es posible utilizando extractos enzimáticos recuperados del RRH con eficiencias del 90%

Los resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos por la estudiante de Ingeniería en Bioprocesos Miriam Aranda Dávila en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí como parte de su proyecto terminal de noveno semestre en el periodo enero – junio del 2024 bajo el asesoramiento del autor del presente escrito.

7.5.1 Los factores de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer de extracción y hongo afectan la remoción para ambos colorantes

En la Fig. 37 se presentan las muestras que tuvieron la mejor remoción al tiempo 0 y 120 horas. Para la decoloración del azul de bromofenol se puede apreciar que hay un cambio de una coloración azul inicial a un amarillo pardo, que corresponde al color del extracto enzimático recuperado del RRH. En cuanto al rojo Congo se pudo observar que la muestra inicial tiene una coloración prácticamente negra, tras las 120 horas de reacción del extracto enzimático se observó que pasa a un color rojizo en donde es importante observar que no hay presencia de una precipitación.



Fig. 37 Muestras de colorante con enzima en tiempos de reacción de 0 y 120 horas para azul de bromofenol y rojo Congo.

Los resultados obtenidos para la decoloración de los colorantes rojo Congo y azul de bromofenol en cada uno de los buffers y temperaturas empleadas sin agitación se

muestran en las Fig. 38 y Fig. 39, respectivamente. En este caso se muestran únicamente estas condiciones dado que fueron las muestras con mayor porcentaje de decoloración, se pudo apreciar que existe una relación indirectamente proporcional de la remoción de color conforme se disminuye la temperatura para ambos colorantes.

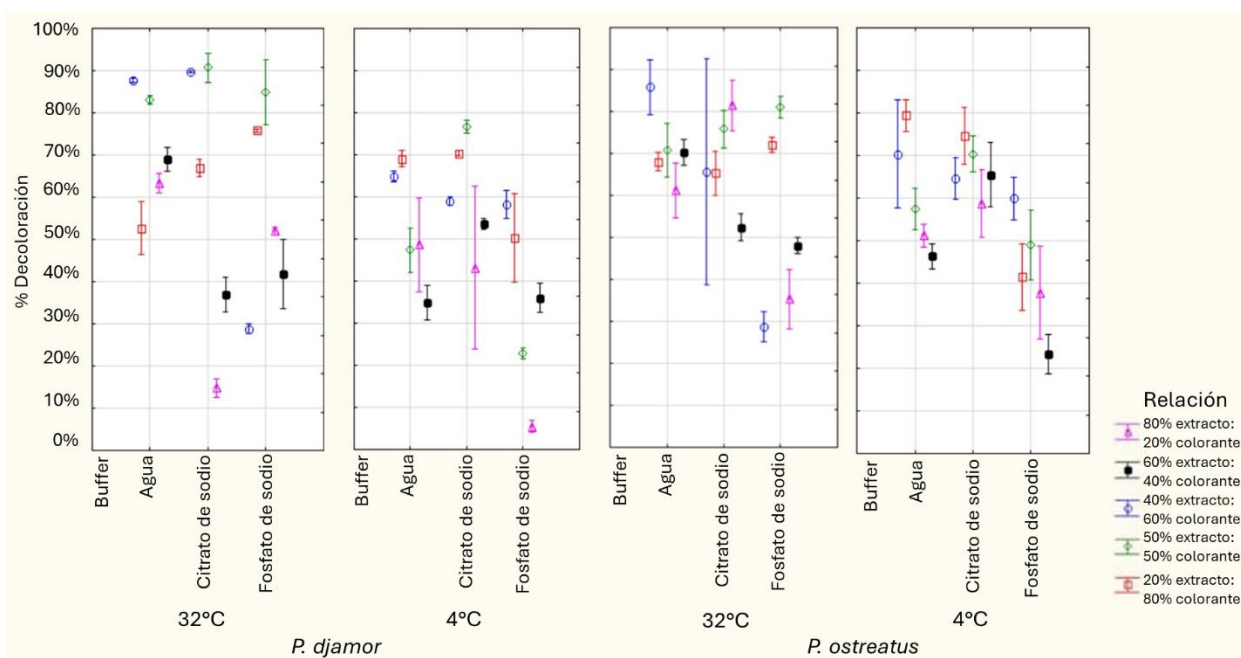


Fig. 38 Porcentaje de decoloración de rojo Congo a 32°C y 4°C sin agitación para los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH de ambas especies de hongo

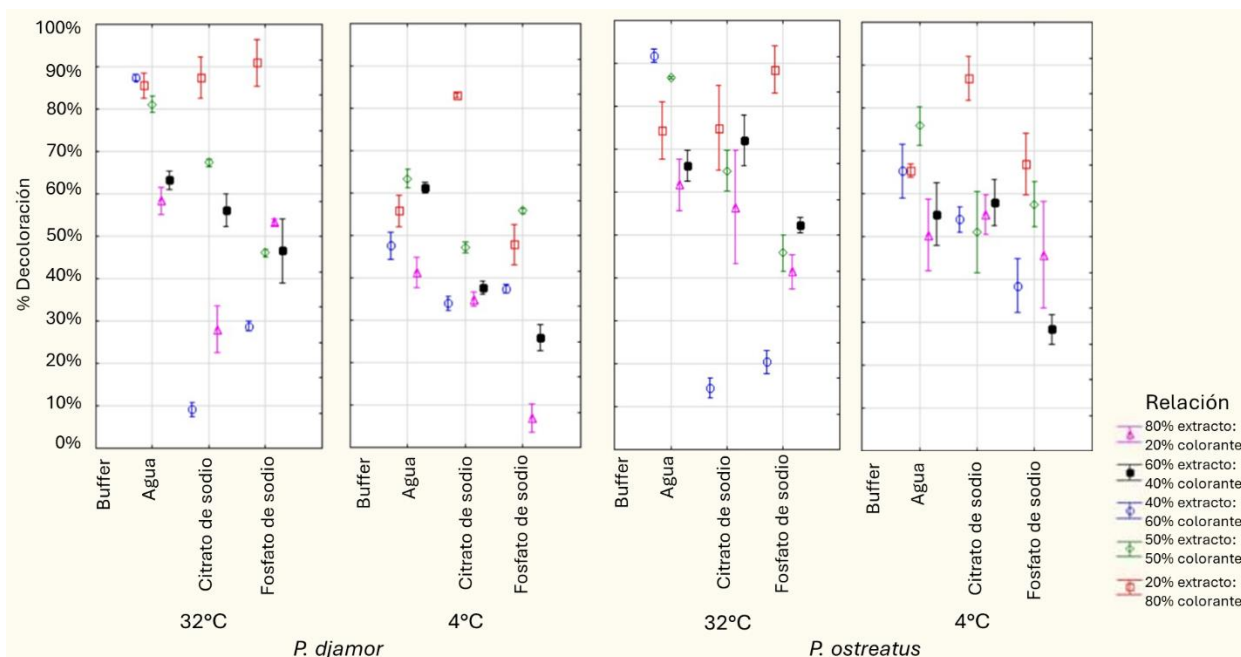


Fig. 39 Porcentaje de decoloración de azul de bromofenol a 32°C y 4°C sin agitación para los extractos crudos enzimáticos recuperados del RRH de ambas especies de hongo

En la Tabla 11 se muestran las comparaciones entre las condiciones de agitación, temperatura, buffer, dilución de extracto: colorante y especie para el colorante azul de bromofenol en donde se parte del resultado de 32°C sin agitación con una relación de 40% extracto:60% colorante, utilizando agua de la llave como buffer de extracción. Se observó que este extracto enzimático del RRH de *P. ostreatus* fue el que presentó una mayor decoloración ($91.75\% \pm 1.50\%$).

En cuanto al ensayo con agitación se puede apreciar que la actividad de decoloración disminuyó un 34.4%, contrario a lo que se tiene reportado en la literatura en donde la agitación promueve la decoloración en un 26% (Vats, et al., 2022).

Al realizar el cambio de temperatura a 4°C se puede apreciar que hay un decremento del 34.4%, este rango se propuso para poder evaluar los extremos de temperatura que se presentan a lo largo del año pensando en una posible aplicación en campo en el futuro, así mismos reportes en la literatura indican que las temperaturas óptimas para la decoloración se encuentran entre 26-36°C (Papinutti, et al., 2011).

La relación de extracto con colorante es otro parámetro importante a evaluar, reportes en la literatura indican que existe una concentración óptima de colorante y si este aumenta, el efecto en la decoloración será negativo posiblemente debido a un efecto tóxico sobre el micelio del hongo o afectando la AE de las enzimas (Rhadika, et al., 2014), en este trabajo la mayor decoloración se alcanzó con la relación de 40% extracto: 60% colorante, y en segundo lugar la relación 50% extracto: 50% colorante que presentó un 5% menos decoloración.

Otro fenómeno que se observó con respecto a la relación fue que las muestras que contenían 60% y 80% de enzimas presentaron fluctuaciones en la absorbancia del colorante pasando de valores menores a mayores a lo largo del tiempo lo que sugiere un fenómeno de adsorción en lugar de decoloración, por ello se recomienda para futuros ensayos relaciones iguales o menores del 50% de extracto. Los reportes indican que la biomasa obtenida del RRH del cultivo de hongos del género *Pleurotus* funcionan como bio adsorbentes de dicho colorante con hasta un 89.89% de eficiencia para colorantes como el azul de ramazol brillante R a pH 2 después de 15 días con la adición de 0.1 mL de Tween 80 como surfactante (Lee, et al., 2022), este mismo fenómeno se ha reportado utilizando los cuerpos fructíferos de los hongos del género *Pleurotus* con una eficiencia de hasta un 31.19 % con 10 g de hongo seco para en 100 mL de solución con una concentración de colorante de 500 mg/L (Evyar, et al., 2021).

En cuanto al buffer utilizado se sabe que este afecta directamente a la capacidad de decoloración de las enzimas ya que el cambio de dicha variable redujo hasta en un 71% la decoloración, esto conlleva al cambio de 2 principales factores, siendo el primero de ellos el pH cuyos valores óptimos se encuentran entre 5-6 (Rhadika, Roseline, & Gnanadoss, 2014), y el segundo es la presencia de elementos traza como boro, cobre, hierro y cobalto que está demostrado que incrementan la actividad enzimática de lacasas y peroxidasas en hongos como *Grammothele fuligo* hasta en 10 veces (Chauhan R. , 2019).

El cambio de especie también conllevó a un cambio en el porcentaje de decoloración, en este trabajo el uso del extracto proveniente de *P. djamor* tuvo un 4% menor de

capacidad de decoloración comparada con respecto a *P. ostreatus*. Reportes en la literatura indican que existe una diferencia en la capacidad de decoloración dependiendo de la especie de hongo utilizada (Eichlerová, et al., 2006).

Tabla 11 Porcentaje de decoloración de azul de bromofenol a diferentes condiciones de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer y especie de hongo

Experimento	Relación	Buffer	Hongo	% decoloración
32°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Agua de la llave	<i>P. ostreatus</i>	91.75% ± 1.50% ^a
32°C con agitación	40% extracto: 60% colorante	Agua de la llave	<i>P. ostreatus</i>	60.24% ± 4.23% ^c
4°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Agua de la llave	<i>P. ostreatus</i>	70.39% ± 12.61% ^c
32°C sin agitación	50% extracto: 50% colorante	Agua de la llave	<i>P. ostreatus</i>	86.70% ± 0.36% ^b
32°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Fosfato de sodio	<i>P. ostreatus</i>	20.45% ± 2.70% ^d
32°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Agua de la llave	<i>P. djamor</i>	87.55% ± 0.76% ^b

Las comparaciones de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer de extracción y especie de hongo para la decoloración del rojo Congo se muestran en la Tabla 12, se puede apreciar que la mejor condición para decoloración fue a 32°C sin agitación, dilución 50% extracto: 50% colorante en buffer de citrato de sodio con el extracto crudo enzimático del hongo *P. djamor*. El porcentaje de decoloración fue de 90.68% ± 3.39%. A partir de esta condición se hacen las comparaciones subsecuentes y el efecto de las diferentes condiciones sobre la capacidad de decoloración.

En este estudio se observó que el porcentaje de decoloración disminuyó un 29.4% cuando se agitó la reacción, contrario a lo reportado en la literatura en donde se tienen mayores porcentajes de remoción con agitación (Vats, et al., 2022).

El cambio de temperatura conlleva también al cambio de la decoloración, se observó que la reducción de 32°C a 4°C durante la reacción provocó una reducción del 13.68%

en la capacidad de decoloración de los extractos enzimáticos. Este resultado es similar a lo reportado para los extractos recuperados de *Pleurotus sajor – caju* en donde se obtiene un 64.5% de decoloración a 35°C que se reduce un 21.7% al disminuir la temperatura 30°C y hasta un 44% al elevarla 50°C (Bettin, et al., 2019), si bien, dentro de este reporte únicamente se tienen variaciones por encima de la temperatura inicial reportes para extractos enzimáticos de *Aspergillus niger* indican una reducción de hasta un 40% cuando se pasa de una temperatura de 30°C a 15°C y de hasta un 50% cuando hay un cambio de temperatura de 30°C a 45°C, este cambio de capacidad de decoloración del extracto se puede explicar por una reducción en la AE de las enzimas o su inactivación por elevadas y bajas temperaturas respectivamente (Asses, et al., 2018).

En cuanto al cambio de la relación extracto: colorante se observó que no existe una diferencia significativa en el porcentaje de remoción del colorante. Se ha reportado que la saturación es un factor presente en dichas relaciones ya que, los resultados en los cuales al establecer la concentración óptima de extracto ya no hay un incremento en el porcentaje de decoloración al incrementar el porcentaje del propio extracto (Vats, et al., 2022).

Se observó que no hay diferencia significativa en la decoloración al utilizar diferentes buffers citrato de sodio pH 4.5 o fosfato de sodio pH 7, ambos buffers presentan fuerza iónicas similares, por lo cual el resultado indicó que el pH no es una variable que afecte en gran medida la decoloración, contrario a lo que se tiene en otros reportes en la literatura en donde para *Pleurotus sajor – caju* el pH óptimo para decoloración es de 4.5 presentando porcentajes menores conforme el pH incrementa (Pilatin & Kunduhoglu, 2016).

En cuanto al cambio de especie se tuvo una reducción de un 14.82% con el extracto recuperado de *P. djamor*, reportes en la literatura indican que existe una diferencia en la capacidad de decoloración dependiendo de la especie de hongo utilizada (Eichlerová, et al., 2006).

Tabla 12 Porcentaje de decoloración de rojo Congo a diferentes condiciones de temperatura, agitación, relación extracto: colorante, buffer y especie de hongo

Experimento	Relación	Buffer	Hongo	% decoloración
32°C sin agitación	50% extracto: 50% colorante	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	90.68% ± 3.39% ^a
32°C con agitación	50% extracto: 50% colorante	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	61.28% ± 2.21% ^c
4°C sin agitación	50% extracto: 50% colorante	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	77.00 % ± 2.00% ^b
32°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	89.83% ± 0.25% ^a
32°C sin agitación	50% extracto: 50% colorante	Fosfato de sodio	<i>P. djamor</i>	84.88% ± 7.64% ^{a,b}
32°C sin agitación	50% extracto: 50% colorante	Citrato de sodio	<i>P. ostreatus</i>	75.86% ± 4.44% ^b

En la Tabla 13 se pueden observar los 14 mejores resultados obtenidos para la decoloración de ambos colorantes del presente proyecto, en este caso se puede apreciar que la interacción entre todas las variables conlleva a porcentajes de decoloración similares, así mismo al comparar las medias obtenidas se pudo observar una tendencia con respecto a dichos parámetros. Empezando con la agitación cuando se prescinde de ésta, se obtienen las mayores medias de decoloración como se discutió anteriormente, sin embargo, la adición de agitación puede promover la decoloración cuando la temperatura es de 4°C como se puede apreciar en el caso de azul de bromofenol a 32°C y a 4°C bajo las mismas condiciones de relación 40% extracto: 60% colorante en agua como buffer de extracción de la especie *P. ostreatus*; en donde no existe diferencia entre el resultado obtenido en ambos casos. Por lo tanto, la agitación puede ser un parámetro que se utilice cuando la temperatura es de 4°C.

En cuanto a la relación en 14 de los 15 casos presentados (exceptuando rojo Congo a 4°C con agitación con una relación de 80% extracto: 20% colorante en buffer de citrato de sodio para el hongo *P. djamor*) la proporción de extracto es del 50% o menos, predominando la de 20% extracto: 80% colorante (6 casos) y 40% extracto: 60%

colorante (5 casos), estos resultados apoyan lo presentado por Vats, et al. (2022) en donde se indica que existe una relación óptima en el porcentaje de extracto enzimático utilizado y que si ésta se incrementa no es proporcional al porcentaje de decoloración, en este caso incluso tuvo efectos negativos al disminuir el porcentaje de decoloración de los extractos crudos enzimáticos, promoviendo fenómenos como la adsorción. Los resultados del presente trabajo sugieren entonces que se utilicen relaciones de 20% extracto: 80% colorante y 40% extracto y 60% colorante.

El buffer utilizado también es un factor importante en el porcentaje de decoloración, siendo el mejor el agua de la llave ya que de los 15 resultados mostrados, 8 corresponden a este, seguido por el citrato de sodio con 5 y finalmente el fosfato de sodio con lo restante. Esto se puede deber a que en el agua de la llave se tienen diferentes minerales que pueden actuar como cofactores que promueven la actividad de los extractos enzimáticos y por lo tanto su capacidad de decoloración ya que elementos como el boro, cobre, hierro y cobalto incrementan la actividad enzimática de lacasas y peroxidasas (Chauhan R. , 2019). Esto presenta además una ventaja económica ya que es más barato usar únicamente agua de la llave a tener que preparar buffers de extracción con sales específicas en pH óptimos usando agua destilada como matriz. Pensando en un posible escalamiento esto sería una gran ventaja al momento de buscar los menores costos posibles. Sin embargo, sería importante realizar un perfil de minerales en el agua que se utilizó ya que este perfil cambia según la zona de la que esta sea extraída (Azoulay, et al., 2001), (Kirolos & Bhaskar, 2022), (Henderickx, et al., 2022).

Las enzimas del RRH recuperadas de los hongos *Pleurotus* utilizados en este trabajo, son útiles para realizar la decoloración de rojo Congo como de azul de bromofenol.

Tabla 13 Porcentajes más altos de decoloración obtenidos en el presente trabajo

Experimento	Relación	Buffer	Hongo	% decoloración
Azul de bromofenol 32°C sin agitación	40% extracto: 60% colorante	Agua	<i>P. ostreatus</i>	91.75% ± 1.50% ^a

Azul de bromofenol 4°C sin agitación	20% extracto: colorante	40%	Fosfato de sodio	<i>P. djamor</i>	90.97% ± 5.56% ^a
Rojo Congo 32°C sin agitación	50% extracto: colorante	50%	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	90.68% ± 3.39% ^a
Azul de bromofenol 4°C con agitación	40% extracto: colorante	60%	Agua	<i>P. ostreatus</i>	89.53% ± 4.28% ^a
Azul de bromofenol 4°C con agitación	20% extracto: colorante	80%	Fosfato de sodio	<i>P. djamor</i>	87.97% ± 3.86% ^a
Rojo Congo 4°C con agitación	80% extracto: colorante	20%	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	88.81% ± 2.16% ^a
Rojo Congo 4°C con agitación	20% extracto: colorante	80%	Citrato de sodio	<i>P. ostreatus</i>	87.00% ± 5.14% ^{a,b}
Rojo Congo 32°C con agitación	40% extracto: colorante	60%	Agua	<i>P. djamor</i>	86.19% ± 8.33% ^{a,b}
Rojo Congo 32°C sin agitación	40% extracto: colorante	60%	Agua	<i>P. ostreatus</i>	85.84% ± 6.62% ^{a,b}
Rojo Congo 32°C con agitación	40% extracto: colorante	60%	Agua	<i>P. ostreatus</i>	84.65% ± 7.05% ^{a,b}
Azul de bromofenol 4°C sin agitación	20% extracto: colorante	80%	Agua	<i>P. ostreatus</i>	79.50% ± 3.72% ^b
Rojo Congo 4°C sin agitación	20% extracto: colorante	80%	Agua	<i>P. ostreatus</i>	80.00% ± 4.00% ^b
Azul de bromofenol 4°C sin agitación	50% extracto: colorante	50%	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	76.68% ± 1.64% ^b
Rojo Congo 4°C sin agitación	50% extracto: colorante	50%	Citrato de sodio	<i>P. djamor</i>	77.00% ± 2.00% ^b
Azul de bromofenol 32°C con agitación	20% extracto: colorante	80%	Agua	<i>P. djamor</i>	63.22% ± 2.25% ^c

El espectro del extracto crudo enzimático recuperado de ambas especies se muestra en la Fig. 40, se puede apreciar que existe un área bajo la curva pronunciada por detrás de los 600 nm.

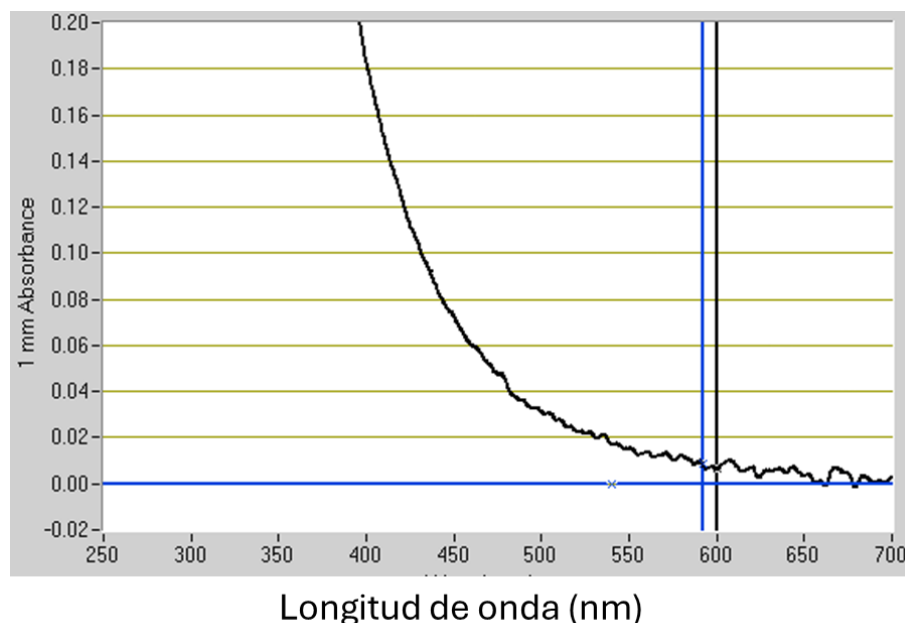


Fig. 40 Espectro del extracto crudo enzimático

Los espectros correspondientes a la muestra de extracto crudo enzimático con colorante rojo Congo cuya medición de absorbancia fue a 498 nm se muestran en la Fig. 41. De lado izquierdo se observa la muestra a tiempo 0 con una absorbancia de 0.372, mientras que de lado derecho se tiene la misma muestra a 96 horas con una absorbancia de 0.125, esto representa una decoloración del 66.40%. Se pudo apreciar que el pico correspondiente al colorante rojo Congo (498 nm) se reduce drásticamente sin generar nuevos picos, manteniéndose tanto el pico del colorante como el pico de la enzima, reportes en la literatura indican que la degradación de este colorante genera compuestos con un 92% menor toxicidad (determinados por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier) tras el tratamiento con lacasas purificadas de *Oudemansiella canarii*, y que pueden llegar incluso a ser degradados por diferentes tipos de bacterias una vez que la estructura central y el enlace azo han sido rotos (lark, et al., 2019), resultados similares han sido reportados para este mismo colorante con lacasas provenientes de *Aspergillus niger* con una decoloración (determinada por UV-Vis, FTIR y LC MS/MS) de hasta un 97% utilizando biomasa fresca; en donde 27% de la decoloración se debe a procesos de adsorción y el 77% restante a procesos de

degradación enzimática además de tener un efecto desintoxicante en las muestras tratadas (Asses, et al., 2018).

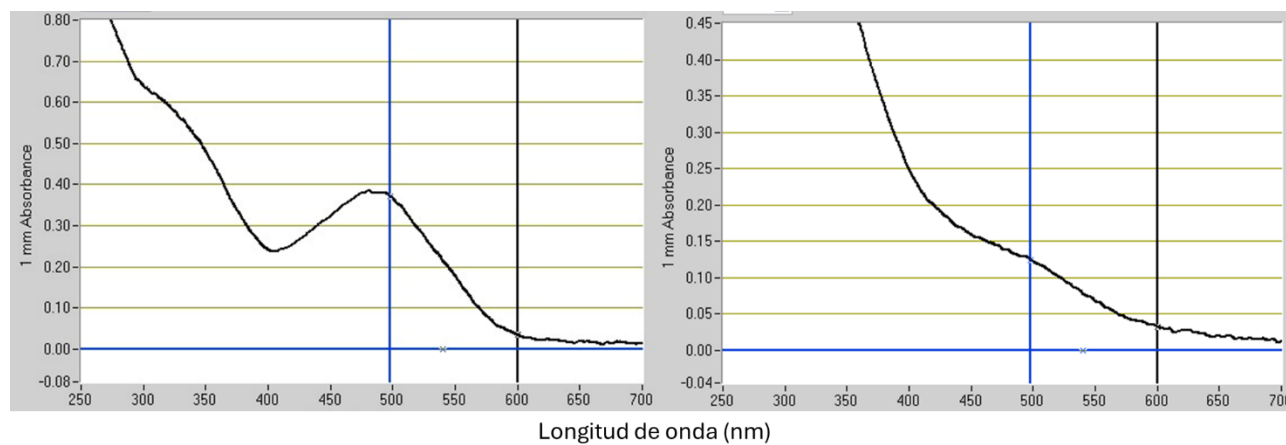


Fig. 41 Espectros de rojo Congo. De lado izquierdo al tiempo 0 y de lado derecho a las 96 horas de ensayo observándose remoción del colorante

En la Fig. 42 se muestra de lado izquierdo el espectro de la muestra con enzima al tiempo 0 con una absorbancia de 0.209 a 592 nm y de lado derecho la misma muestra después de 120 horas con una absorbancia de 0.032 a 592 nm, lo que representa un 84.69% de decoloración, y fue 592 nm la longitud de onda utilizada para el monitoreo del colorante azul de bromofenol.

Se pudo apreciar que no existen nuevos picos de absorbancia, además de que la muestra post tratamiento tiene un espectro similar al del extracto crudo enzimático (Fig. 41).

Reportes en la literatura indican porcentajes de decoloración de 79.1% (Zhuo, et al., 2019) y 76.33% (Kumar, et al., 2020) para este colorante con lacasas purificadas provenientes de hongos del género *Pleurotus*. Sin embargo, en la presente investigación no se encontró algún reporte en la literatura en donde se determinen los subproductos de esta reacción o su toxicidad, siendo un área de oportunidad para investigaciones futuras.

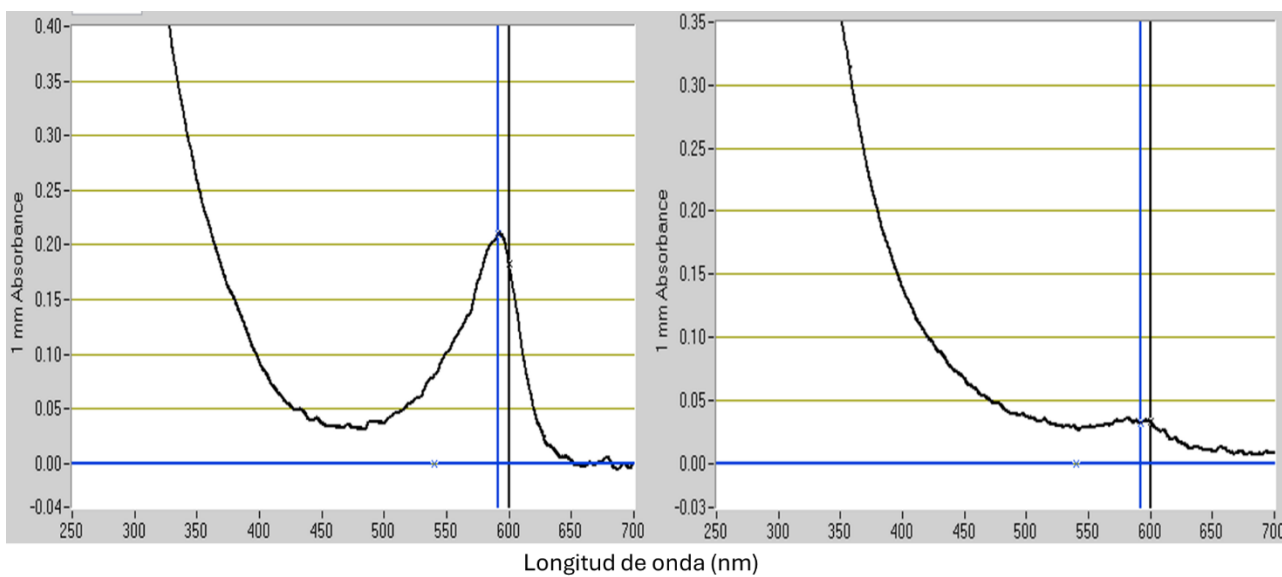


Fig. 42 Espectros de azul de bromofenol, de lado izquierdo al tiempo 0 y de lado derecho a las 120 horas del ensayo observándose remoción del colorante

7.5.2 Las lacasas no son las únicas enzimas involucradas en el proceso de decoloración del azul de bromofenol y rojo Congo

Los experimentos se realizaron a lo largo de 4 meses en donde se realizó una única extracción con los buffers presentados anteriormente, sin embargo, con el fin de asegurar la mayor estabilidad de las proteínas posible se hizo una primera concentración de los extractos con la mitad de la cantidad recuperada, dejando la otra mitad almacenada a -20°C para ser concentrada después de 2 meses.

En ambos casos se midió la concentración de proteínas en los extractos crudos enzimáticos concentrados en donde se obtuvo un valor promedio de $85.70 \text{ mg/mL} \pm 2.55 \text{ mg/mL}$ sin presentar diferencias significativas entre los diferentes buffers ni periodos de tiempo. Así mismo se midió la actividad enzimática de las lacasas en ambos periodos de tiempo ya que en un inicio se pensaba que esta era la enzima que tenía una mayor implicación en la decoloración del rojo Congo y del azul de bromofenol. Sin embargo, el resultado que se tuvo fue una reducción de la actividad de lacasas en un 29% para *P. djamor* y 31.3% para *P. ostreatus*, aunque esta

disminución no afectó a la capacidad de decoloración por lo cual hay más enzimas implicadas en dicho proceso.

Reportes en la literatura indican diferentes porcentajes de decoloración para lacasas purificadas con diferentes colorantes, en el caso de lacasas purificadas de *Pleurotus ostreatus* estas tienen una capacidad de decoloración de un 66% del colorante SN4R que incrementa hasta un 90% con la adición de un 0.16% de ABTS como mediador de lacasas (Hou, et al., 2004), para rojo Congo un 91.05% $\pm$ 0.82% con la adición de 1.5 mM de nitrato de plomo como mediador (Isanapong, et al., 2024), para azul de bromofenol de un 79.1% con 3 isoformas diferentes de lacasas (Zhuo, et al., 2019). Si bien, en el caso del rojo Congo reportado en la literatura el valor es muy cercano al obtenido en el presente trabajo es importante recalcar que este se logra mediante la adición de un mediador que incrementa su capacidad de decoloración, mientras que en el azul de bromofenol el porcentaje de remoción es un 10% menor. Así mismo es importante notar que en el caso del colorante SN4R el porcentaje de decoloración también incremento tras la adición de un mediador.

En cuanto a los consorcios enzimáticos se tiene que estos pueden presentar porcentajes de decoloración de 64.5% (Bettin, et al., 2019) hasta 95% (Yehia & Rodríguez, 2017) para rojo Congo y para azul de bromofenol de hasta 98.03% con *Pleurotus pulmonarius* (Contato, et al., 2020). El incremento de capacidad de decoloración se puede deber a la presencia de diferentes enzimas en el extracto crudo como peroxidasas, lacasas, polifenol oxidasas, azoreductasas (Husain, 2006) y tirosinasas (Sharma, et al., 2022), enzimas las cuales están comprobadas que se encuentran en el RRH de los hongos del género *Pleurotus* (Husain, 2006), (Sharma, et al., 2021).

En este caso es una ventaja el utilizar un extracto crudo enzimático ya que no conlleva a los gastos de purificación de enzimas, además de que se tiene una buena actividad de decoloración sin la necesidad de utilizar un mediador, aunque su uso podría ser útil para alcanzar porcentajes aún mayores. Así mismo de esta manera se puede aprovechar el RRH para una aplicación que conlleva a la biorremediación.

7.5.3 Consideraciones para mejorar la capacidad de decoloración

El uso de mediadores como nitrato de plomo o ABTS se podrían implementar para estudiar como es que estos afectan al porcentaje de decoloración de los extractos enzimáticos para intentar alcanzar valores cercanos al 100%, así mismo se propone que se hagan estudios con variación de pH en valores entre 3-7 utilizando agua de la llave como buffer de extracción, de igual manera es importante realizar análisis de minerales al agua de la llave para corroborar cuales de estos podrían funcionar como cofactores que afecten de forma positiva a la capacidad de decoloración de los extractos. Otra implementación que se puede estudiar es la adición de cofactores como sulfato de cobre 2 mM como inductor de lacasas y enzimas oxido reductoras desde la siembra del micelio en su sustrato (Ge, et al., 2024) así como la variación de niveles C/N y fuentes de nitrógeno que suplementen al sustrato. Se propone además medir la toxicidad de las muestras tratadas o la inhibición de crecimiento celular en medios preparados con dichas muestras.

7.6 El uso de RRH como suplemento de sustrato para el cultivo de jitomate en sistema de hidroponía promueve el crecimiento del tamaño de la raíz manteniendo constante la humedad de esta e incrementando el porcentaje de germinación

Los resultados de los cultivos en hidroponía se presentan en la Tabla 14, se observó que existe un efecto en el uso de RRH, siendo el tamaño de raíz el que se ve más influenciado de forma positiva por el suplemento con este residuo.

Tabla 14 Variables de la raíz y de la germinación de la planta de jitomate cultivado en diferentes muestras de sustrato en sistema de hidroponía

Muestra	Tamaño de raíz (cm)	Humedad de raíz	Porcentaje de germinación
Control Tierra	38.2 ± 3.6 ^a	94.09% ± 0.54% ^a	66.7% ± 16.7% ^{a,b}
Bajo RRH	70.6 ± 15.9 ^b	94.09% ± 0.22% ^a	77.8% ± 5.5% ^{a,b}
Alto RRH	40.0 ± 5.1 ^a	92.97% ± 1.16% ^a	75.0% ± 0% ^b
Control RRH	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^b	50% ± 21% ^a

En la Fig. 43 se presenta el crecimiento de las plantas a las 2 semanas de experimento (a) y en el último día de este (b). Se observó que cualitativamente las plantas fueron más frondosas cuando se utilizaron la tierra (CT) y la mezcla de bajo RRH (BRRH) en comparación con la mezcla de alto RRH (ARRH), así mismo se pudo apreciar que el control RRH (CRRH) no generó crecimiento vegetal, ya que primero creció el hongo *P. djamor* y una vez que éste se marchitó permitió el desarrollo de la planta.

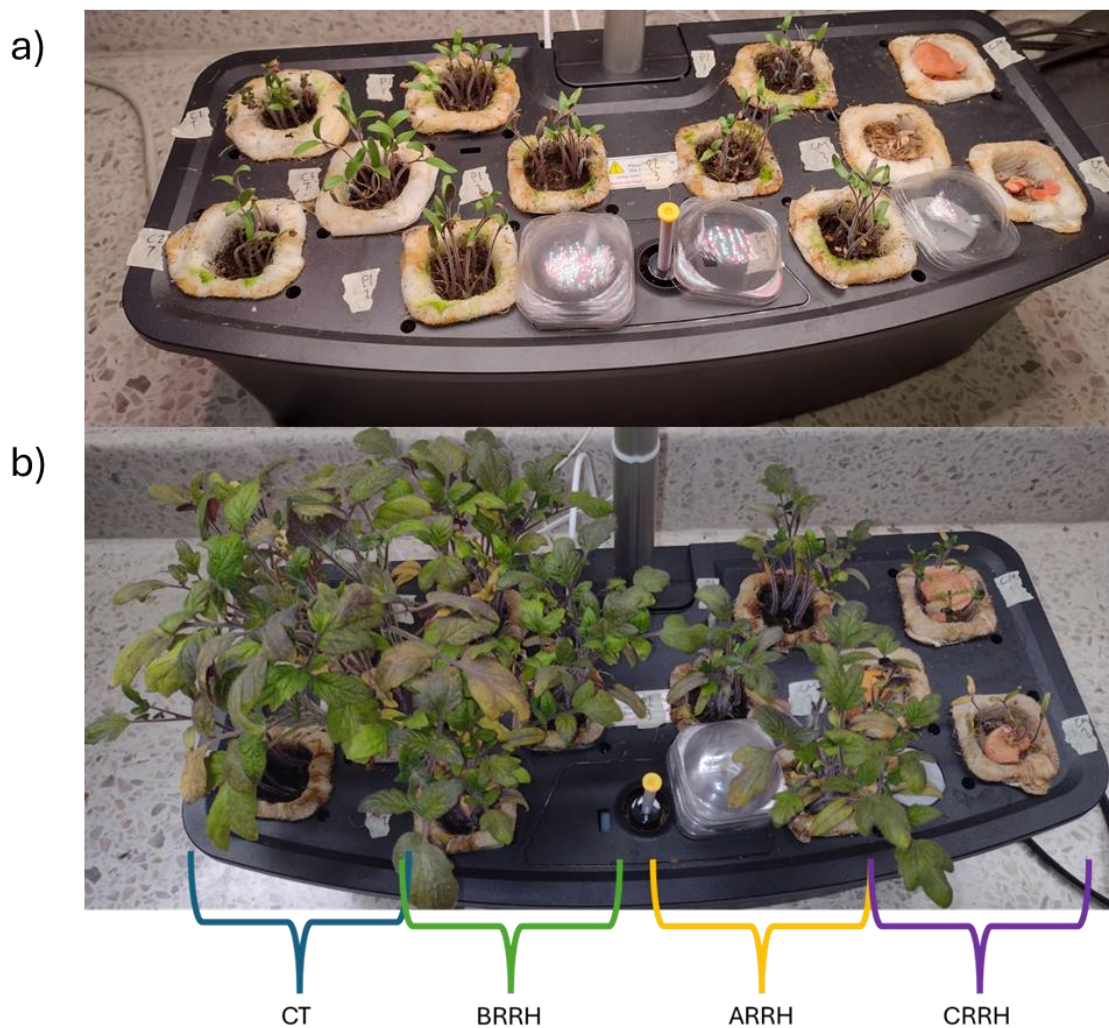


Fig. 43 Plantas de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos, Control Tierra (CT), Bajo RRH (BRRH), Alto RRH (ARRH) y Control RRH (CRRH). Panel a) 2 semanas de experimento, b) último día del experimento

7.6.1 El tamaño de raíz tiene un incremento del 84.81% cuando se adiciona RRH en una baja proporción

Los resultados para las muestras de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos propuestos en este trabajo se muestran en la Fig. 44. Se observó que el tamaño de raíz es igual cuando se utilizó tierra (CT) y la mezcla de composta de Alto RRH (ARRH). Además, la mezcla de composta de Bajo RRH (BRRH) permitió un incremento del tamaño de raíz en un 84.81% con respecto al control. Así mismo se pudo apreciar que el control RRH (CRRH) no promovió el desarrollo vegetal y se observó que no hubo raíz fuera de la cavidad donde se sembró.

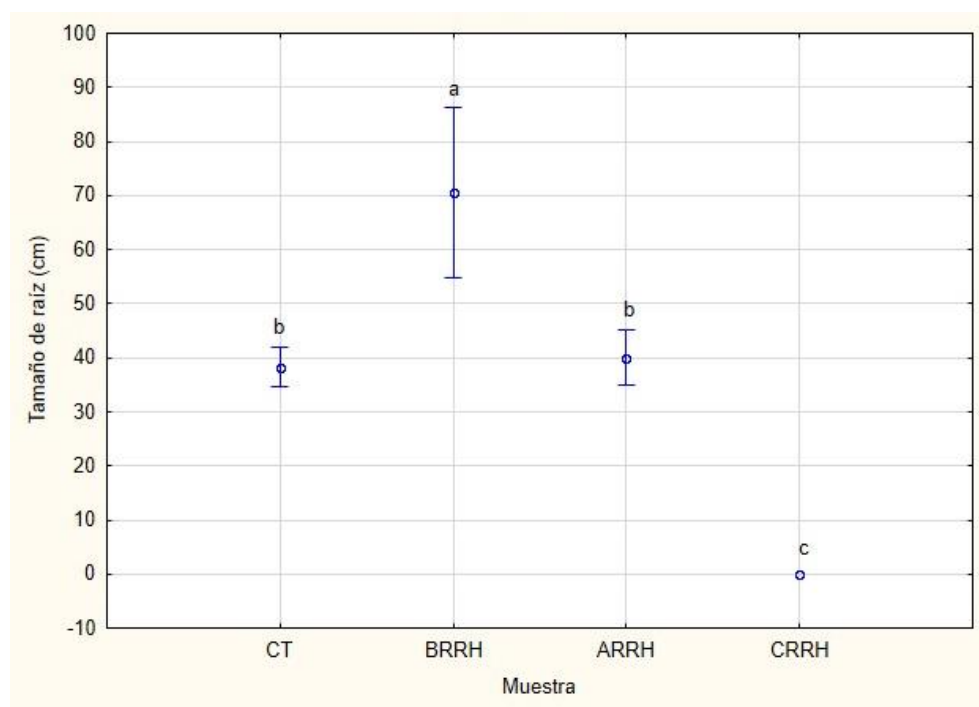


Fig. 44 Tamaño de raíz (cm) para cada uno de los tratamientos en el crecimiento de jitomate en un sistema de hidroponía

El tamaño de la raíz es un factor importante en la salud de las plantas ya que estas son las responsables de la absorción de agua y nutrientes provenientes del suelo, además de mantener la planta en su lugar (Logsdon,2015)g, aunque reportes en la literatura indican que el mecanismo por el cual las raíces absorben el agua y la transportan al resto de la planta aún permanece incierto, existe una relación en el

tamaño de esta con la cantidad de agua y minerales absorbidos (Duddek, et al., 2023). El tamaño de la raíz está condicionado al tipo de suelo, los nutrientes y la disponibilidad de agua, así mismo existe una relación entre las raíces, el tallo y las hojas, si las raíces no se desarrollan de forma correcta tampoco lo harán los otros órganos a pesar de que las condiciones sean las correctas e inclusive se ha reportado que el volumen de raíz está directamente relacionado con el crecimiento limitado de las plantas (Koyun & Acar, 2015).

Por lo tanto, como el tamaño de raíz que presentó la mezcla de composta BRRH es mayor que el tamaño de la raíz presente en tierra pero de menor volumen (Fig. 45 a y b) se esperaba un correcto crecimiento de las plantas de jitomate, además de incrementar el tamaño de tallo y el número de hojas.

Nuestros resultados sugieren que el uso de RRH pudo suplementar los nutrientes al suelo a una concentración óptima o bien promoviendo una correcta retención de agua del mismo, lo anterior puede observarse en tierra (Fig. 45b) y al utilizar la mezcla de composta con ARRH (Fig. 45c), permitiendo así proponer que el uso de mezclas de RRH favorecerá el crecimiento de jitomate. En cuanto a CRRH (Fig. 45d) se observó que no existe raíz que sobresalga de la cavidad utilizada como soporte, esto sugiere que este sustrato no cuenta con la cantidad de nutrientes suficiente para promover el correcto crecimiento del jitomate.

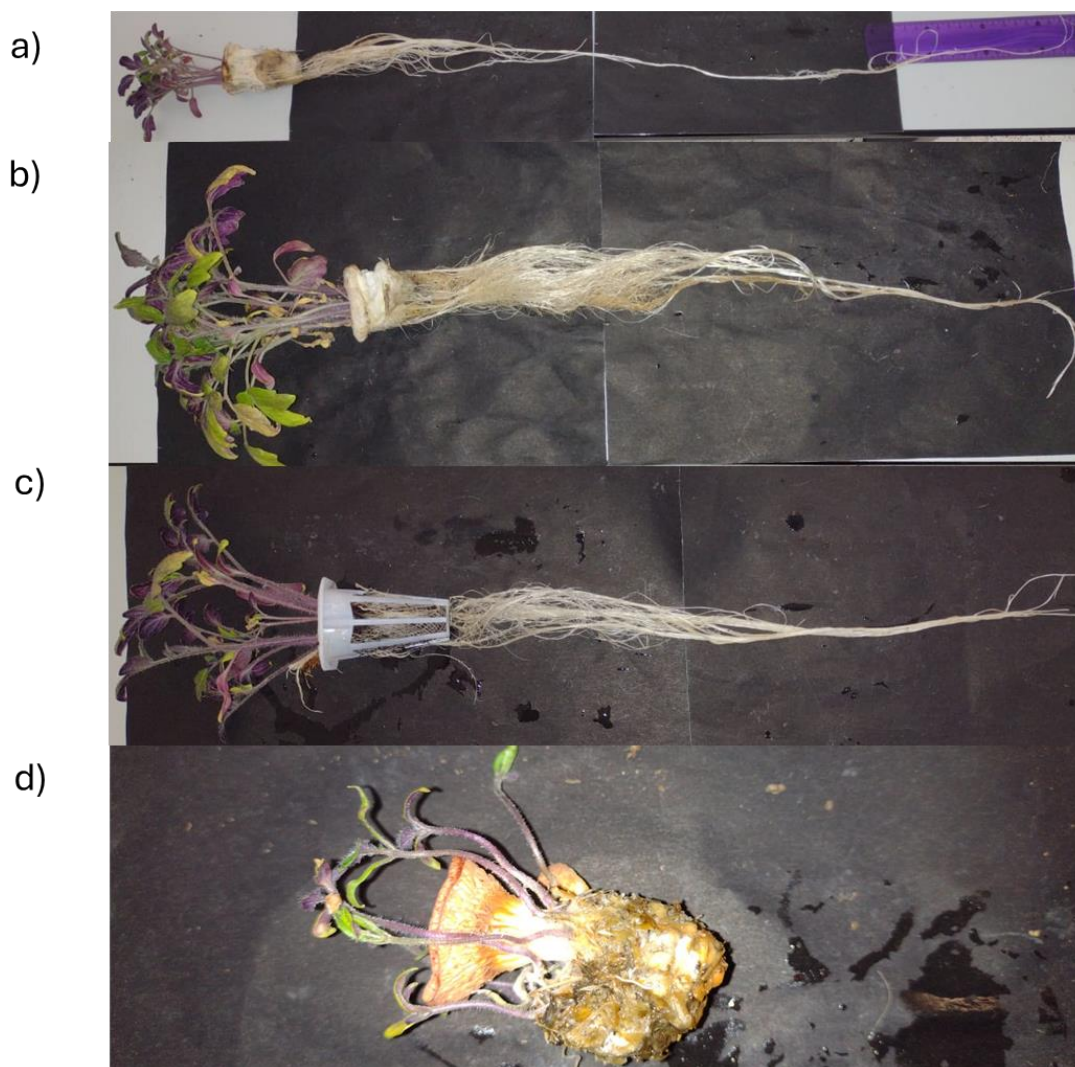


Fig. 45 Tamaño de la raíz para cada uno de los sustratos a) BRRH, b) CT, c) ARRH, d) CRRH

Para el tomate híbrido “Merlice” tras 35 días de crecimiento en sistema hidropónico y fertilizado con la solución de nutrientes Hoagland, se reportó que el tamaño de la raíz fue de 7.6 cm (Abdelkader, et al., 2021), mientras que en nuestro trabajo se observaron valores de raíz hasta 10 veces por encima de Abdelkader et al. (2021), sin embargo, si se compara en un cultivo a escala piloto del tomate var. Campbell 33 sembrado por 52 días en agua con solución de nutrientes de Hoagland enriquecido con fósforo y potasio en contenedores de 3 L el tamaño de raíz fue de hasta 4,000 cm (Naciri, et al., 2022), siendo 57 veces mayor que el tamaño de raíz observado en nuestro trabajo a escala laboratorio.

Sería conveniente realizar en lo sucesivo la cuantificación de estos minerales en los sustratos que fueron utilizados en las mezclas de tierra con RRH y en caso de no estar presentes en suficiente cantidad, se sugiere que para ensayos futuros se suplementen las mezclas con fósforo y potasio, ya que son elementos traza clave que favorecen el crecimiento de la raíz.

Por otro lado, la humedad de la raíz no presento diferencias entre las muestras de CT, BRRH y ARRH. En la Fig. 46 se muestran los resultados obtenidos de la humedad de las raíces recuperadas tras 45 días en el sistema de hidroponía, se observó que las muestras CT, BRRH y ARRH no presentan una diferencia significativa entre sí, y los valores de humedad fueron de 92.97-94.09%. Sin embargo, el valor de humedad presente en CRRH fue de 0% debido a que no fue posible recuperar raíces (Fig. 46a)

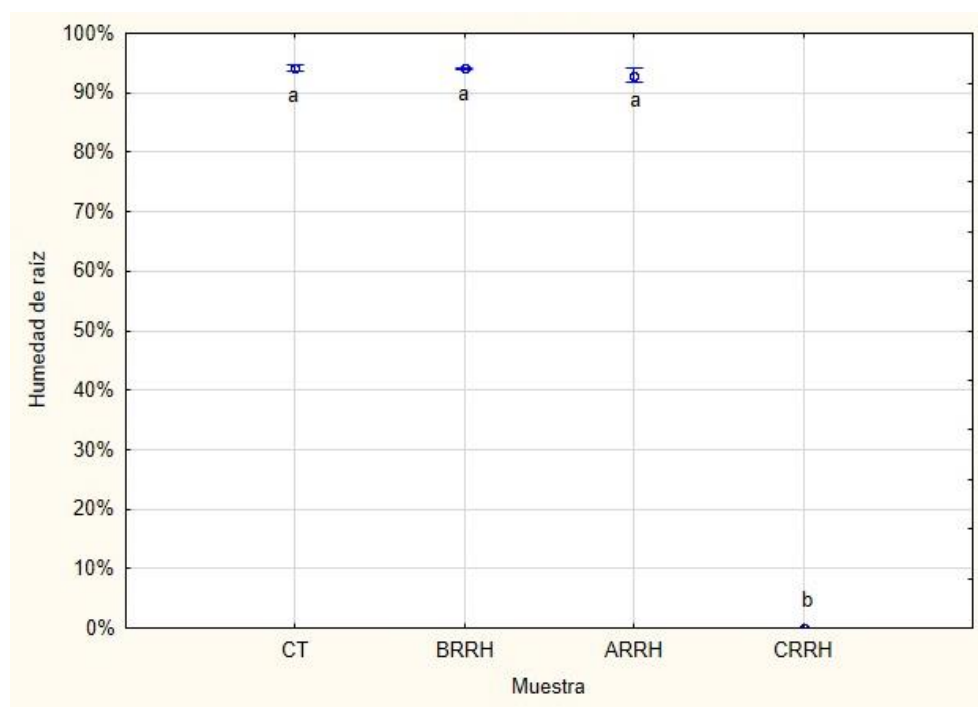


Fig. 46 Humedad de las raíces en los diferentes sustratos utilizados en el crecimiento de jitomate en un sistema de hidroponía

En el presente trabajo no se encontraron reportes en la literatura acerca de la humedad en las raíces en sistemas de hidroponía, sin embargo, se encontró que las raíces

únicamente crecen de forma correcta cuando hay humedad en el sustrato (Europress, 2022), así mismo la dirección que tomen estas raíces dependerá de las fuentes de agua o humedad cercanas que encuentren para su desarrollo gracias a la hormona ácido abscísico, y si hay zonas que carecen de agua, la raíz las evitará y seguirá su camino hacia zonas húmedas o nichos de agua con la ayuda de esta hormona (Miao, et al., 2021).

Al no tener entonces variación en la humedad de las raíces y estar en un sistema hidropónico en donde éstas siempre están en contacto con el agua se puede inferir que la diferencia de los tamaños de raíz observados en los resultados del apartado 6.6.1 se debe a la presencia de nutrientes en el sustrato utilizado para cultivar las plantas, sin embargo, se requieren análisis de minerales, carbono orgánico y relación C/N para poder realizar una conclusión sobre este postulado.

7.6.2 El menor porcentaje de germinación se tuvo en la muestra CRRH, e incremento en las muestras BRRH y ARRH en comparación de CT

Los resultados correspondientes al porcentaje de germinación de las semillas en los diferentes sustratos se muestran en la Fig. 47. Se pudo apreciar que la germinación significativa fue cuando se utilizó la mezcla de ARRH, sin embargo, si se toman en consideración las medias se puede observar que las muestras que contenían RRH en su matriz tuvieron un incremento en la germinación con respecto de tierra (CT).

Reportes en la literatura indican que en sistemas hidropónicos el porcentaje de germinación oscila entre 90% - 95% y en suelo un buen promedio se considera cuando la germinación alcanza hasta un 70% (Progressive Growth, 2014), así mismo otras fuentes indican que para trigo en hidroponía se puede alcanzar hasta un 98% cuando los nutrientes presentes en el agua son los óptimos (Yurina, et al., 2019). En cuanto al suelo este es un parámetro importante también para alcanzar un mayor porcentaje de germinación en semillas de jatrofa siendo que en suelo franco arenoso (en condiciones óptimas) se reportó un 76%, en suelo arenoso un 75% y en suelo franco arcilloso un 24% (Valdés, et al., 2013).

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se encuentran un 20% por debajo a lo reportado para hidroponía, sin embargo, hay que considerar que el desarrollo del proyecto no fueron utilizadas sales específicas u auxinas suplementadas para favorecer la germinación, ya que el objetivo era conocer el efecto del RRH sin compostar para valorizar su uso sin aumentar el costo de la mezcla. Por lo anterior, los resultados sugieren que los nutrientes que aprovecho la semilla para germinar provenían de las combinaciones de sustrato y de las sales minerales presentes en el agua de la llave. Así mismo, se pudo apreciar que el porcentaje de germinación se encuentra dentro de los rangos reportados de germinación de plantas en suelo.

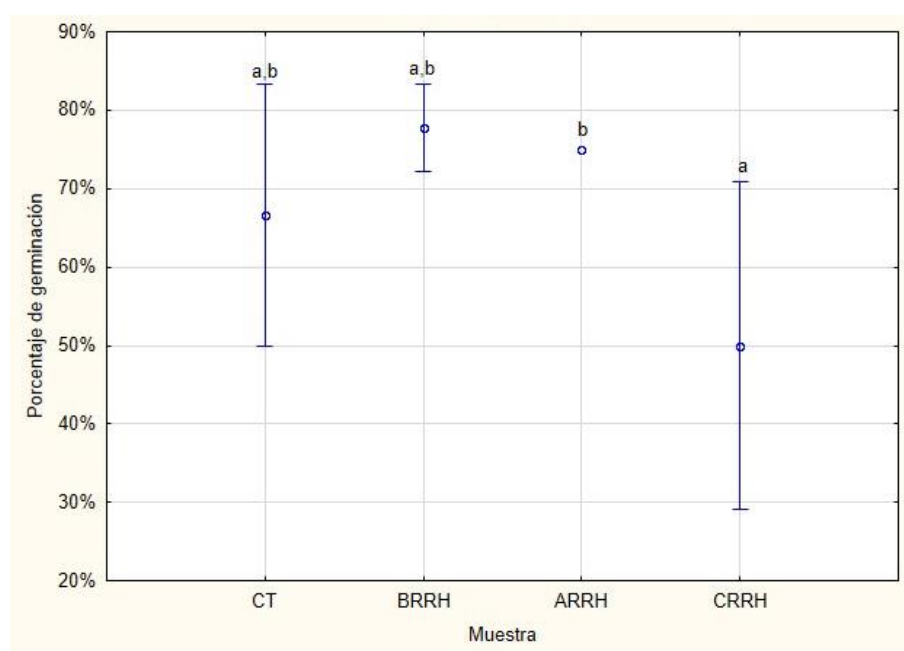


Fig. 47 Porcentaje de germinación de las semillas en diferentes sustratos para el cultivo de jitomate

7.6.3 Los parámetros en el crecimiento del tomate presentan diferencias entre el CT con respecto a ARRH y CRRH en todos los casos pero no así con BRRH donde únicamente varía la medida del tallo.

Los resultados de las variables de crecimiento de las plantas de jitomate para cada uno de los sustratos utilizados se presentan en la Tabla 15, se observó que el tamaño de tallo fue mayor en tierra CT (6.43 ± 0.36 cm), seguido por el tamaño de tallo que

promovió la mezcla de BRRH (5.62 ± 0.15 cm), y no se presentó diferencia en la humedad de la planta ni en el número de hojas, sin embargo, si hubo diferencia con respecto a las demás muestras. Los resultados indican que la mezcla de BRRH favorece la formación de tallo de manera significativa cuando se comparó con la mezcla ARRH y con CRRH.

Así mismo en la Fig. 48 se muestran las plantas de jitomate recuperadas del sistema de hidroponía, se pudo apreciar de manera cualitativa que existe una diferencia entre el tamaño de los tallos de cada una de las plantas del mismo grupo.

Tabla 15 Variables en el crecimiento de la planta de jitomate en cada uno de los sustratos utilizados en el sistema de hidroponía

Muestra	Medida del tallo (cm)	Humedad de la planta	Número de hojas
Control Tierra	6.43 ± 0.36^a	$81.91\% \pm 2.24\%^a$	8.04 ± 0.68^a
Bajo RRH	5.62 ± 0.15^b	$83.47\% \pm 0.73\%^a$	7.96 ± 0.21^a
Alto RRH	4.50 ± 0.17^c	$77.07\% \pm 1.32\%^b$	6.33 ± 0.36^b
Control RRH	2.50 ± 0.11^d	$55.45\% \pm 7.00\%^c$	2.61 ± 0.26^c

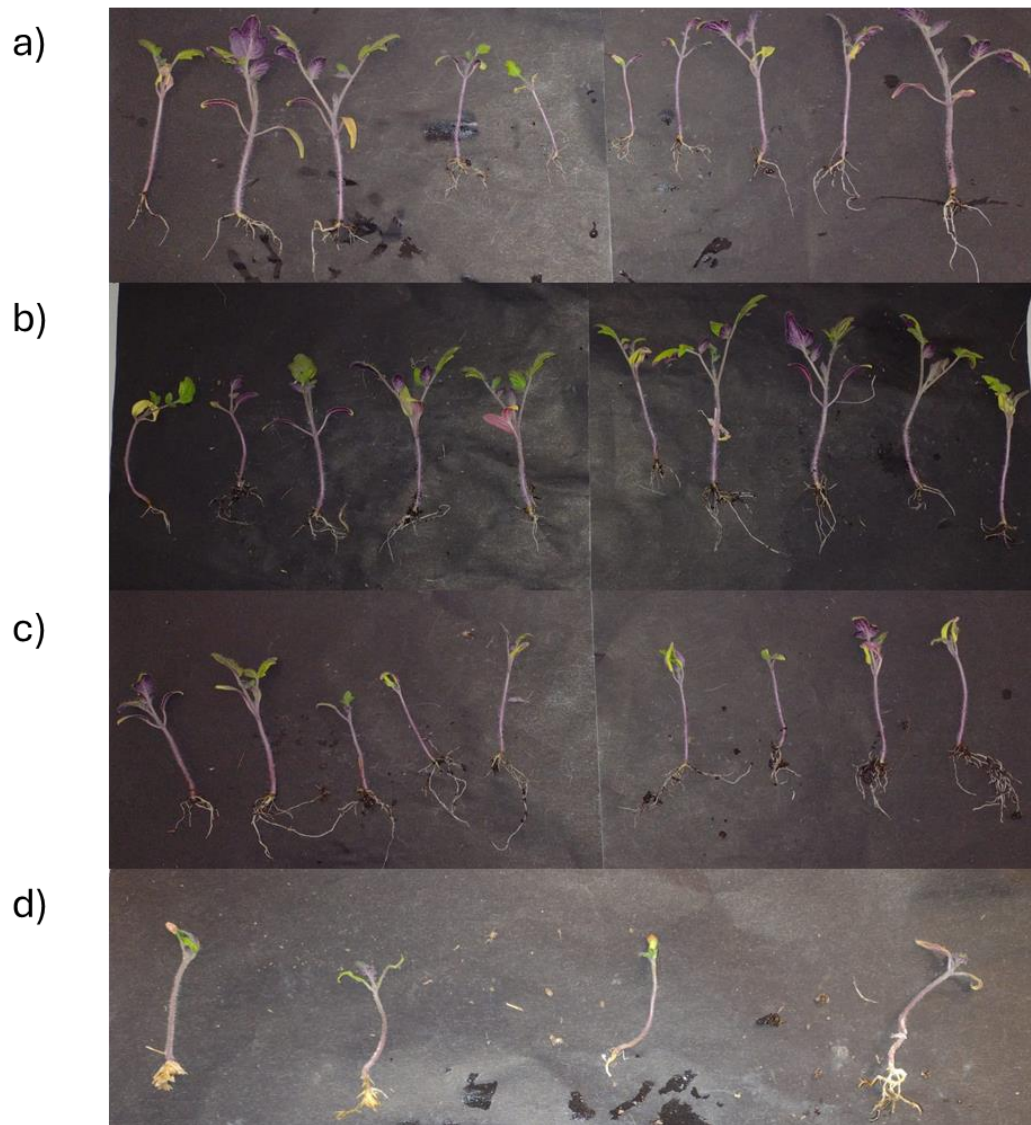


Fig. 48 Plantas de jitomate cultivadas en un sistema de hidroponía en diferentes sustratos. a) CT, b) BRRH, c) ARRH, d) CRRH

7.6.4 El sustrato empleado afecta la medida del tallo, siendo CT la de mayor medida seguido por BRRH después por ARRH y finalmente por CRRH

Los resultados de la medida de tallo de las plantas de jitomate se muestran en la Fig. 49, se observó que existe una diferencia entre todos los sustratos utilizados, para CT (Fig. 48a) el tallo fue el de mayor tamaño y solamente es 1.14 veces mayor que el tallo

generado en la mezcla de BRRH (Fig. 48b), 1.43 veces respecto a la mezcla ARRH (Fig. 48c) pero 2.57 veces con respecto a la mezcla sin compostar CRRH (Fig. 48d), en este caso la cantidad del RRH es indirectamente proporcional al tamaño del tallo.

Los resultados en el apartado 6.6.1 indican que el mayor tamaño de raíz se obtuvo en la mezcla BRRH por lo que las plantas de este ensayo deberían favorecer la absorción de nutrientes y por lo tanto generar mayor tamaño de tallo, ya que esto está asociado a la disponibilidad de nutrientes y agua en el medio, así como en el tamaño de la raíz (Ludwig, et al., 2006); (Lin, et al., 2020), en este ensayo los minerales presentes en agua de llave se desconocen, sin embargo, en el sistema de hidroponía todas las plantas de los distintos tratamientos se encuentren bajo la misma condición, por lo cual la diferencia sería la disponibilidad de nutrientes. Es necesario para estudios a futuro realizar el análisis de minerales, carbono orgánico y relación C/N para poder realizar una conclusión sobre este postulado.

Existen otros factores que afectan al crecimiento del tallo de las plantas como la capacidad de compactación del suelo, cuando este parámetro no se encuentra dentro de un valor óptimo o tiene una mala compactación el desarrollo del sistema radicular se ve afectado, así como también al crecimiento del tallo y los rendimientos de las plantas en general (Duruoha, et al., 2007), además la profundidad del sustrato tiene un efecto en el crecimiento de las plantas (Sánchez, et al., 2009), así mismo la fijación de las raíces estructurales en su sustrato conlleva a un mayor crecimiento en el tallo (Hauer & Johnson, 2021). Otro factor que afecta al crecimiento del tallo es el espaciado entre las semillas ya que conforme estas comienzan a crecer la competencia por los nutrientes en el suelo se vuelve importante (Mia, et al., 2020).

Se reporta que en un periodo de tiempo de 45 días después de la germinación se espera que el tamaño de las plantas de jitomate sea de 15 cm para ser posteriormente trasplantada a un espacio con tierra y promover su crecimiento (Fontalvo, 2021), comparando con los resultados de nuestro trabajo ese valor representa el doble del tamaño de lo obtenido en este proyecto.

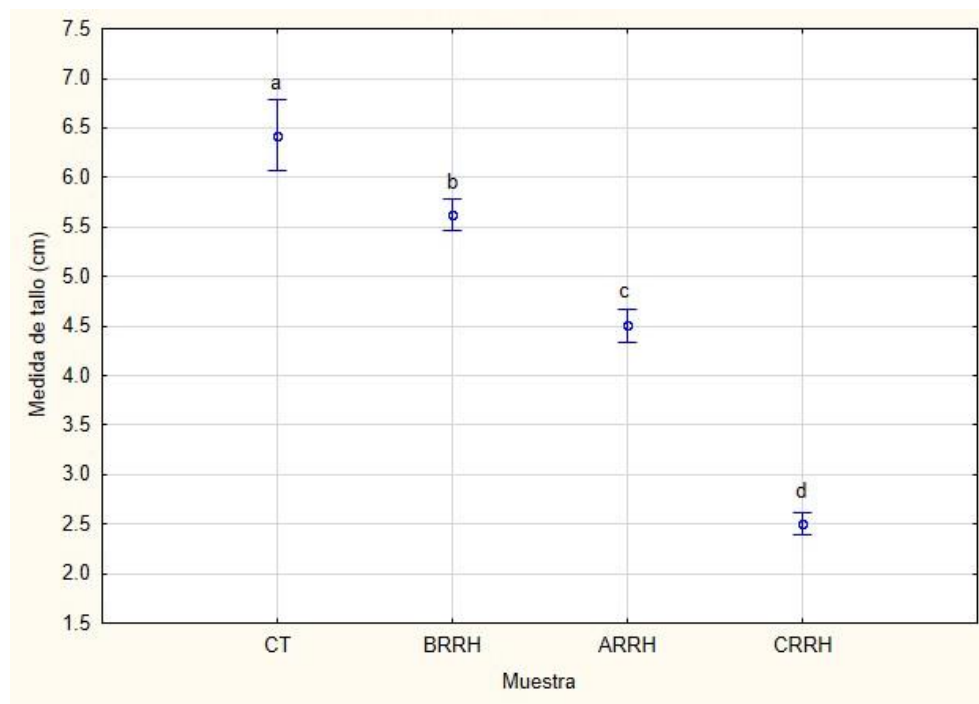


Fig. 49 Medida de tallo (cm) para cada una de las muestras de sustrato utilizadas para el cultivo de jitomate en hidroponía

7.6.5 Suplementar el sustrato de crecimiento con RRH en ambas concentraciones no afecta a la humedad de la planta y mantiene este valor dentro del óptimo para que esta crezca de forma adecuada

Los resultados de humedad presente en las plantas de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos se muestran en la Fig. 50 en donde se puede apreciar que las muestras CT y BRRH son las que mayor porcentaje de humedad mostraron y cuyo valor de $81.91\% \pm 2.24\%$ y $83.47\% \pm 0.73\%$ respectivamente no difirieron significativamente. Para la mezcla ARRH el valor obtenido fue 6% menor y finalmente para CRRH, la humedad fue 32% menor.

Reportes en la literatura indican diferentes cantidades de humedad para las plantas y las condiciones de crecimiento. Para *Scirpus grossus* y frijol se reportó un 90% de contenido de humedad (Voijant, 2015) (Miftahurrohmat & Sutarman, 2018), en jitomate de 78% (Sorgoná, et al., 2011). El agua tiene un papel crucial en el desarrollo de las plantas ya que está implicada en diferentes procesos, como transporte de nutrientes y

transpiración, así mismo las propiedades mecánicas de las plantas son dependientes de la cantidad de humedad, su localización y distribución en los tejidos y células (Levinsh, 2023), afecta también a la conductancia de la planta (Díaz, et al., 1995), además afecta a las propiedades mecánicas y estructurales de la planta al regular la turgencia de sus células (Sutherland, et al., 2023), también es importante para el proceso de la fotosíntesis ya que cuando las plantas se encuentran en estrés de sequía las concentraciones de clorofila se reducen de manera vertiginosa conllevando a la degradación de estos pigmentos (Wahab, et al., 2022).

Al comparar los resultados obtenidos con los de la literatura se observó que para todos los ensayos CT, BRRH y ARRH el contenido de humedad de la planta estuvo dentro de los valores reportados, sin embargo, para CRRH el valor de humedad estuvo por debajo de lo reportado. Esto afectó en gran medida a la planta en cuanto a su estructura, su funcionalidad y por lo tanto los rendimientos que se podrían esperar de esta. Por lo anterior, el uso de mezclas de RRH favorecen el contenido de humedad durante el desarrollo vegetal del jitomate.

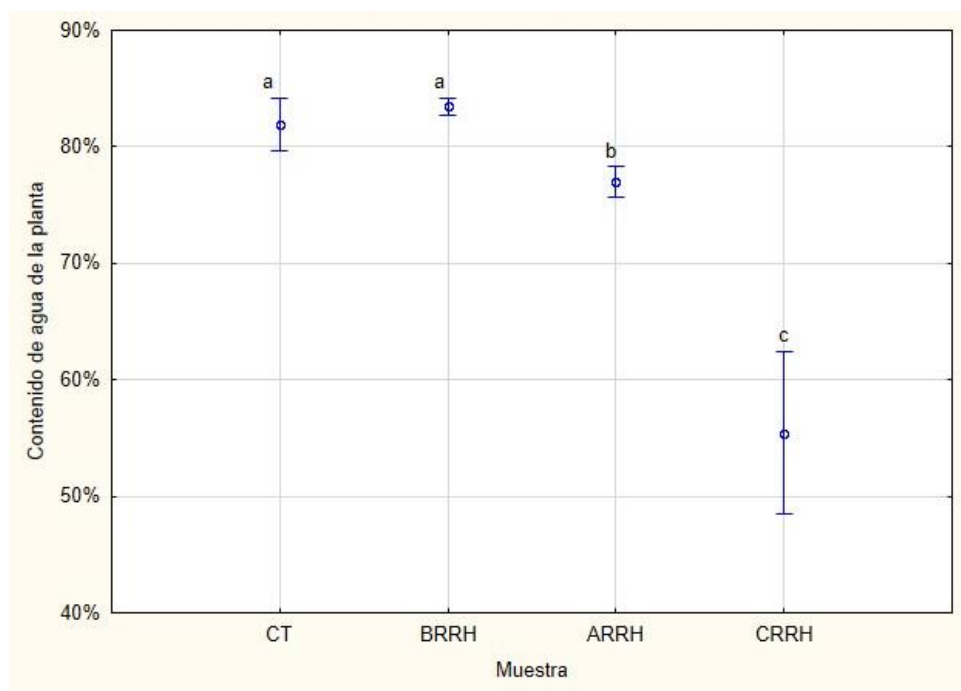


Fig. 50 Humedad de las plantas del jitomate en los diferentes sustratos

7.6.6 El número de hojas no varía entre la muestra CT y BRRH, pero si muestra una disminución con respecto a ARRH y CRRH

El número de hojas de las plantas se presentan en la Fig. 51. Se observó que la cantidad de hojas presentes cuando se utilizó CT y BRRH fue estadísticamente igual. Sin embargo, si hubo diferencia en la cantidad de hojas al utilizar la mezcla ARRH y CRRH, cuyos valores fueron 21% y 67% menos hojas con respecto del uso de sustrato CT o BRRH.

Reportes en la literatura sugieren realizar el trasplante de jitomate de sus cavidades iniciales de cultivo hacia contenedores más largos, cuando la altura de la planta este entre 3 y 4 pulgadas, y posea 3 o más sets de hojas (Swett, 2017), otras fuentes reportan que el momento ideal para el trasplante es entre 5-6 semanas después de haber realizado la siembra y cuando las plantas tienen entre 5-7 hojas (Drost, 2020), así mismo hay estudios que reportan hasta 10 hojas para realizar el trasplante, mientras mayor sea el número de hojas que se tengan, mayor será la cantidad de pigmentos fotosintéticos y área específica de hojas, facilitando así el proceso de la fotosíntesis (Jankauskieno, et al., 2013).

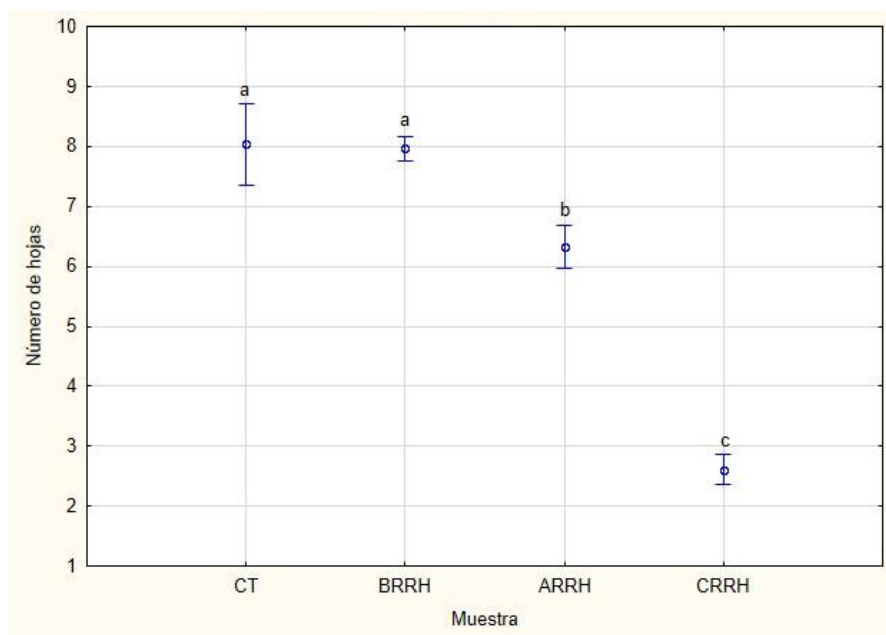


Fig. 51 Número de hojas de las plantas de jitomate cultivadas en los diferentes sustratos

Los resultados observados para el número de hojas utilizando tierra (CT), mezclas de sustrato BRRH y ARRH estuvieron dentro de los rangos reportados por distintos autores para el crecimiento del jitomate, mientras que CRRH no favorece el desarrollo de hojas. Los resultados obtenidos demuestran que para un sistema de hidroponía se sugiere una mezcla con RRH siendo la apropiada la proporción del ensayo BRRH, ya que promovió el crecimiento radicular manteniendo todos los demás parámetros iguales al control de tierra, y cuyo tamaño del tallo fue solo 1.14 veces menor. Así mismo no se recomienda utilizar únicamente el RRH como único sustrato como fue el ensayo CRRH ya que afectó el desarrollo del jitomate. Adicionalmente, se propone en futuros trabajos el análisis de la composición de la mezcla de sustratos utilizados en estos ensayos, así como los minerales presentes en el agua de llave utilizada.

7.7 Cultivo en tierra del jitomate

Los resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos por la estudiante de Ingeniería en Bioprocesos Karol Polet Juárez Cruz en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí como parte de su proyecto terminal de noveno semestre en el periodo enero – junio del 2024 bajo el asesoramiento del autor del presente escrito.

7.7.1 La humedad de la composta es la óptima para su desarrollo

El porcentaje de humedad presente fue de 78.52% para la mezcla de composta baja en RRH (CBRRH) y de 79.38% para la mezcla de composta alta de RRH (CARRH). Los reportes en la literatura indican diferentes niveles de humedad dependiendo del tipo de composta y pueden tener valores en el rango de 65% - 70% (Wisbaum, 2021), 60% - 80% (Ahn, et al., 2008), 57% - 70% (Eunjong, et al., 2016). Sin embargo, otros autores indican que por encima del 60% el sustrato se vuelve grumoso y difícil de esparcir (Amery, et al., 2020), así mismo, niveles por encima del 65% de humedad se ha observado que provocan la falta de oxígeno y por lo tanto la prevalencia de microorganismos anaerobios que pueden poner en riesgo la salud humana ya que además emiten un fuerte olor a amonio (Willis, et al., 2022).

Si bien la humedad que presentaron las mezclas de composta de este trabajo está por encima de algunos reportes, el resultado obtenido mostrado en la Fig. 52 fue satisfactorio, ya que en ningún momento despidió olor a amonio y se observó crecimiento microbiano correspondiente a hongos filamentosos como se observa de lado izquierdo (Fig. 52), además de un sustrato compostado mostrado de lado derecho (Fig. 52).



Fig. 52 Composta realizada a partir de tierra y RRH, de lado izquierdo durante el proceso de compostaje y de lado derecho una vez terminado.

7.7.2 Microorganismos presentes en la composta

Los hongos presentes en los sustratos compostados se muestran en la Fig. 53, estos fueron identificados morfológicamente teniendo como resultado la identificación de *Trichoderma spp.* y *Aspergillus niger*. Para CRRH no se identificó ningún microorganismo presente ya que no fue compostada, así mismo las muestras CARRH y CBRRH estériles no presentaron ningún tipo de microorganismo.

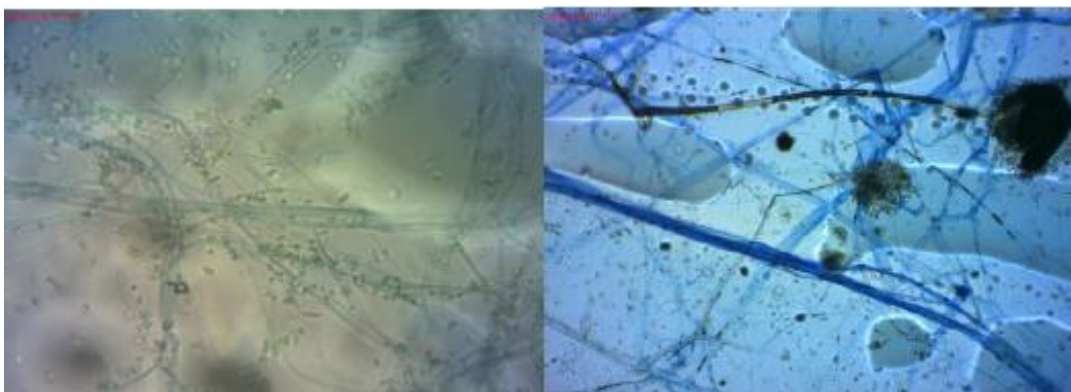


Fig. 53 Estructura morfológica de *Trichoderma* spp. (izquierda) y *Aspergillus niger* (derecha) observados e identificados en microscopio óptico con un aumento de 400x

Los hongos del género *Trichoderma* tienen un efecto benéfico en el crecimiento del jitomate, estos promueven el crecimiento de las plantas al inducir una mayor acumulación de biomasa, incrementa el tamaño del tallo, de las raíces y el número de hojas tanto a nivel de campo como de invernadero (Rodríguez & Vargas, 2022). Este hongo además funciona como agente de control biológico contra fitopatógenos gracias a sus mecanismos de acción que incluyen antibiosis, emisión de compuestos volátiles antifúngicos, producción de enzimas de defensa, mico parasitismo (Celis, et al., 2023) así como competencia por nutrientes (Macías, et al., 2018).

En el caso de *Aspergillus niger* la literatura reporta que este hongo tiene también un efecto benéfico en las plantas al promover la producción de ácido indol-3-acético, prolina, flavonoides, fenoles, catalasa, azúcares y proteínas (Aziz, et al., 2021), así mismo su presencia incrementa el tamaño de la raíz, y de la planta (Marques, et al., 2022), además incrementa los contenidos de clorofila en la planta, diámetro del fruto y la acumulación de ácido salicílico (Anwer & Rahman, 2013). Para futuros ensayos se recomienda evaluar estos metabolitos, utilizando HPLC/MS/MS.

7.7.3 Parámetros de evaluación de crecimiento de las plantas en los diferentes sustratos

Los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros evaluados en el crecimiento de las plantas de jitomate en los sustratos se muestran en la Tabla 16, en donde se

puede apreciar que el menor tiempo de germinación corresponde a las muestras CARRH y CBRRH, así mismo la mayor media de porcentaje de germinación corresponde a CBRRH y BRRH, seguido por CARRH y CT, el mayor numero de hojas reales se observa en CARRH, mientras que el mayor contenido de agua se tuvo en CBRRH y CARRH, el mayor tamaño de raíz se tiene para la muestra CBRRH así como el mayor tamaño de tallo.

Tabla 16 Parámetros de crecimiento del jitomate cultivado en los sustratos Control tierra (CT), tierra con RRH sin compostar en alta y baja concentración (ARRH y BRRH), tierra con RRH compostado (CARRH y CBRRH) y tierra con RRH compostado (CARRH y CBRRH) estériles

Sustrato	pH	Días de germinación	Porcentaje de germinación	Número de Hojas reales	Contenido de agua	Tamaño de raíz (cm)	Tamaño de tallo (cm)
CRRH	6.12	Sin germinación	0% ± 0% ^d	0 ± 0 ^f	0% ± 0% ^e	0 ± 0 ^f	0 ± 0 ^d
CT	6.29	8	68% ± 29% ^{a,b}	3.66 ± 2.67 ^c	59% ± 21% ^a	1.88 ± 0.56 ^e	3.03 ± 0.93 ^c
CARRH	6.87	5	67% ± 32% ^a	6.67 ± 2.33 ^a	73% ± 15% ^{c,d}	5.64 ± 1.75 ^b	5.87 ± 1.68 ^a
CBRRH	6.74	5	78% ± 22% ^{b,c}	2.60 ± 2.33 ^{b,c}	79% ± 16% ^d	7.12 ± 1.56 ^a	5.95 ± 2.13 ^a
CARRH estéril	6.72	9	29% ± 31% ^{a,b}	5.31 ± 1.75 ^{a,b}	60% ± 16% ^{a,b}	5.44 ± 2.23 ^b	4.90 ± 1.58 ^b
CBRRH estéril	6.73	10	21% ± 22% ^{a,b}	5.52 ± 2.93 ^{a,b}	69% ± 18% ^{a,b,c,d}	3.12 ± 1.34 ^{c,d}	6.130 ± 1.82 ^a
ARRH	6.25	7	40% ± 20% ^c	1.67 ± 1.31 ^d	62% ± 30% ^{a,b,c}	1.94 ± 0.56 ^{d,e}	2.40 ± 0.78 ^c
BRRH	6.62	8	78% ± 22% ^{b,c}	1.13 ± 0.85 ^{d,e}	69% ± 14% ^{b,c}	3.29 ± 2.17 ^c	3.10 ± 0.77 ^c

7.7.3.1 El pH se encuentra dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de jitomate

Los valores de pH observados para los sustratos utilizados fueron de 6.12 - 6.87 (Tabla 16). Los reportes en la literatura indican que los valores óptimos de pH que favorecen el crecimiento de jitomate son 5.0-7.5 (Astija, 2020) o entre 6.0-7.0 (Chauhan, et al.,

2023), valores por debajo de 5.5 tiene un efecto negativo en la disponibilidad de magnesio y molibdeno, mientras que valores por encima de 6.5 provocan una deficiencia de hierro, manganeso y zinc (Singh, et al., 2024).

Al analizar los datos observados, se pudo apreciar que los valores más elevados de pH fueron para las mezclas compostadas pero los valores siguen encontrándose dentro de lo reportado en la literatura como óptimo, así mismo, sería conveniente estandarizar todas las muestras a un mismo pH inicial.

7.7.3.2 Los días de germinación se redujeron en las muestras CABRRH y CBRRH en un 37.5%

Se observó que la germinación del jitomate utilizando como sustrato tierra (CT), o mezclas con BRRH fue estadísticamente igual. Al utilizar el sustrato ARRHH la germinación tardó un día menos con respecto a CT. Los resultados obtenidos indicaron que el menor tiempo de germinación se tuvo en las plantas que fueron cultivadas en los sustratos compostados CABRRH y CBRRH presentando una reducción de un 37.5% con respecto a las muestras de tierra CT. Para las plantas de jitomates cultivadas con los sustratos CARRH estéril y CBRRH estéril estas requirieron de un periodo de germinación de 1.8 y 2 veces mayor con respecto a CARRH y CBRRH, es decir se alargó más el periodo de germinación por la falta de microorganismos.

Para las mezclas con proporciones CARRH y CBRRH estéril y ARRHH y CBRRH se observó que las muestras que contienen una alta concentración de RRH presentaron un periodo de tiempo germinación menor. Reportes en la literatura indican diferentes factores que afectan el tiempo de germinación en las plantas, entre los cuales se encuentran: pH, disponibilidad de nutrientes (Maldaner, y otros, 2021), textura del suelo, temperatura (Echo Comunity, 2023), humedad del suelo, capacidad de retención del agua y disponibilidad de esta (Campos, et al., 2020). Por lo tanto, en este trabajo la diferencia observada del incremento en un día en el tiempo de germinación de las plantas, se pudo deber a factores como la falta de disponibilidad de nutrientes así como la falta de capacidad de retención de agua del RRH.

En cuanto al uso de RRH como suplemento de suelo, los reportes en la literatura indican que este tiene un efecto positivo al mejorar la capacidad de retención de agua, incrementar la materia orgánica (Pathak, et al., 2021), incrementar la disponibilidad de nitrógeno, así como de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre haciendo que el suelo sea más rico en nutrientes que pueden ser aprovechados por las plantas (Velusami, et al., 2021), además de mejorar la estructura de los suelos debido a su baja densidad de abultamiento y su poder de liberación controlada de sus nutrientes, por tanto el uso de RRH evita procedimientos de quema de suelo o la aplicación de fertilizantes químicos (Kwiatkowski & Harasim, 2021). Estas características pueden explicar la diferencia del tiempo de germinación en un día cuando se utilizó la mezcla de ARRH con respecto a tierra (CT).

Adicionalmente, la presencia de hongos del género *Aspergillus* tienen un efecto benéfico al reducir el tiempo de germinación (Azeez & Shelby, 2022), este mismo fenómeno se observa en semillas de chile que fueron cultivadas con *Tirchoderma* tanto en nivel laboratorio como en campo (Islam, et al., 2011). Como se mencionó anteriormente la presencia de hongos promueve el crecimiento de las plantas, así como el tiempo y porcentaje de germinación por ello es congruente haber observado que las plantas cultivadas en sustratos esterilizados tardaron más tiempo en germinar.

El uso de composta promueve la salud del suelo, además de proveer nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, se recomienda que las compostas se hagan a partir de una relación C/N en el sustrato de 20:1 (Cogger, 2013), otro beneficio del uso de la composta es que promueve la restauración de suelos además de incrementar los rendimientos de las plantas (Shiralipour, et al., 1992). Los microorganismos que se utilizan en la composta ofrecen diferentes beneficios como el incremento de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio principalmente), control de fitopatógenos, promover la producción de fitohormonas, enzimas, vitaminas y antibióticos contribuyendo así a la óptima producción agrícola (Ahmed, et al., 2023).

En nuestro trabajo se logró demostrar que la producción de mezclas de composta a partir de RRH promueven el desarrollo del jitomate, además se ha reportado en

lechuga rendimientos hasta 7 veces mayores con respecto al sustrato sin compostar ayudando además a combatir patógenos como *Pythium irregulare* (Hernández, et al., 2021). Varios factores están involucrados como la disponibilidad de nutrientes, las características del suelo, la salud del suelo mejorada, la promoción de síntesis de compuestos como el ácido indol-3-acético, fitohormonas de las plantas en presencia de microorganismos benéficos como los hongos del género *Trichoderma* y *Aspergillus* que además funcionan como controles biológicos al regular la presencia de organismos fitopatógenos.

7.7.3.3 El porcentaje de germinación incrementa un 10% en la muestra CBRRH con respecto a CT, mientras que CARRH y CT presentan valores similares, así mismo CBRRH tiene un valor 57% mayor a comparación de CBRRH estéril

Los mayores valores de germinación fueron para los cultivos de jitomate en las mezclas BRRH y CBRRH, cuyos valores fueron del 78%, seguida de la germinación del 68% y 67% en tierra (CT) y de la mezcla CARRH, respectivamente. Al utilizar la mezcla de ARRH solamente se observó un tuvo 40% de germinación de las plantas de jitomate, por tanto, no se recomienda esta mezcla para el desarrollo del jitomate.

Los resultados mostrados en la Tabla 16 indicaron que el menor porcentaje de germinación se obtuvo en las muestras cuyo sustrato fue esterilizado, siendo 57% menor a la germinación con respecto a las muestras de composta que no fueron esterilizadas.

Se ha reportado valores de germinación del jitomate de 80% (Cabra, et al., 2016), de 75% para la variedad Rodeo en un suelo con 35 mM NaCl (Sané, et al., 2021) y 74.17% para la misma variedad *in vitro* (Sané, et al., 2021). Nuestros resultados de germinación utilizando las mezclas BRRH y CBRRH son similares a los reportados en la literatura, mientras que los obtenidos para CT y CARRH se encuentran hasta un 12% por debajo. El bajo porcentaje de germinación de los sustratos esterilizados con respecto a los no esterilizados indican también que la presencia de organismos como *Trichoderma* y *Aspergillus niger* promueven el porcentaje de germinación de las

plantas, sustentando lo reportado (Azeez & Shelby, 2022) y de la germinación observada encampo (Islam, et al., 2011).

7.7.3.4 El sustrato CARRH es el que mayor media de hojas presenta con un incremento de hasta un 82% con respecto a la muestra CT.

La mayor cantidad de hojas reales se tuvo cuando se utilizaron mezclas CARRH con un incremento de un 82% con respecto a tierra (CT). Para las mezclas esterilizadas CARRH y CBRRH se observaron valores similares en número de hojas y un incremento del 45% con respecto a los valores presentes con el uso de CT. El uso de la mezcla CBRRH presentó menos hojas (27%) con respecto a CT. En cuanto al uso de mezclas ARRH y BRRH estas mostraron una reducción del número de hojas de un 69% con respecto a tierra (CT). Los reportes en la literatura indican valores de 5-7 hojas (Drost, 2020) o hasta 10 hojas, siendo estas un parámetro crítico debido a su importancia dentro del proceso fotosintético ya que a mayor número de hojas mayor cantidad de pigmentos fotosintéticos y por lo tanto la planta se desarrollará mejor (Jankauskieno, et al., 2013).

7.7.3.5 El contenido de agua de las plantas es comparable con lo reportado en la literatura en las muestras CARRH y CBRRH

En el presente trabajo las plantas de jitomate que crecieron en las mezclas CARRH y CBRRH fueron las que tuvieron los mayores valores (Tabla 16), además de ser similares a lo reportado en la literatura. En los demás ensayos quizá la falta de humedad en el sustrato afectó su desarrollo, esto puede indicar que las muestras que lograron valores cercanos a los reportados en la literatura tienen una mayor capacidad de retención de agua, sin embargo, es conveniente realizar más estudios en donde la humedad del suelo se mantenga en su valor óptimo para evitar que sea un factor que afecte al crecimiento de las plantas.

Los reportes en la literatura indican valores de contenido de humedad en las plantas que difieren según la especie de estudio, en el caso de *Scirpus grossus* el valor reportado es del 90% (Voijant, 2015), en frijol de igual manera un 90% (Miftahurrohmat & Sutarman, 2018), sin embargo, para jitomate se ha reportado un menor contenido

de agua de 78% (Sorgoná, et al., 2011). Como se mencionó en el apartado 6.6.6 la cantidad de agua en la planta es un parámetro importante ya que tiene diferentes implicaciones en la planta como lo son el transporte de nutrientes, transpiración (Levinsh, 2023), conductancia (Díaz, et al., 1995), propiedades mecánicas, estructurales (Sutherland, et al., 2023), así como estar involucrada también en el proceso de fotosíntesis (Wahab, et al., 2022).

7.7.3.6 La composta con bajo RRH tuvo un incremento de 3.79 veces en el tamaño de raíz con respecto a CT, así mismo la presencia de microorganismos tienen un efecto benéfico en el crecimiento de la raíz.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo (Tabla 16) indican que el mayor tamaño de raíz corresponde a la mezcla CBRRH cuyo valor fue 3.79 y 1.26 veces mayor con respecto a CT y CARRH respectivamente, las otras mezclas (a excepción de ARRH) presentaron valores al menos 1.66 veces mayor al control CT.

En el apartado 6.6.1 se presentaron reportes de la literatura que indican que el tamaño de la raíz es un factor importante en la salud de las plantas ya que esta es la responsable de absorber los nutrientes y el agua del suelo además de darle estabilidad a la planta (Logsdon, 2015), así mismo su tamaño está influenciado por la disponibilidad de agua y los nutrientes presentes en el suelo (Koyun & Acar, 2015). La mayor cantidad de nutrientes presentes en el sustrato podría explicar que las muestras que contienen RRH o su composta tengan valores mayores a CT (a excepción de ARRH), así mismo la mezcla CBRRH presentó un valor 2.82 veces mayor con respecto a CBRRH estéril lo cual indica que la presencia de microorganismos como *Trichoderma* y *Aspergillus niger* tienen un efecto benéfico en el crecimiento de la raíz sustentando lo reportado en la literatura (Rodríguez & Vargas, 2022) (Marques, et al., 2022).

7.7.3.7 El tamaño de tallo puede estar influenciado por la presencia de nutrientes en las muestras compostadas, teniendo un valor 62% por encima de CT, así mismo parece no haber relación entre este parámetro con respecto a la presencia de microorganismos.

Los resultados obtenidos indican que las muestras que tuvieron un proceso de compostaje tienen un incremento en el tamaño del tallo de al menos un 62% con respecto a CT, sugiriendo una mayor presencia de nutrientes en estas muestras. En cuanto a las mezclas con composta se pudo apreciar que el tallo del jitomate cultivado en CARRH estéril presentó una disminución de un 17% con respecto a CARRH y CBRRH y un 20% con respecto a CBRRH estéril, estos resultados sugieren que la presencia de microorganismos no tiene mucha influencia sobre el tamaño del tallo, así mismo la mezcla ARRH tuvo una disminución del 21% con respecto al control CT mientras que BRRH mantuvo un valor similar.

Reportes en la literatura indican un tamaño de tallo de hasta 15 cm después de 45 días después de la siembra (Fontalvo, 2021), en el presente trabajo las muestras se encuentran por debajo de este valor por un 60%, esto se puede deber a diferentes aspectos entre los que se encuentra la competencia por nutrientes dado el número de plantas sembradas por cuadrante (Mia, et al., 2020), así como la disponibilidad de agua y tamaño de la raíz (Ludwig, et al., 2006); (Lin, et al., 2020).

Con respecto a los parámetros de germinación, número de hojas y tamaño de raíz, nuestros resultados sugieren que el uso de composta producida a partir de RRH tiene un efecto benéfico en el crecimiento de la planta de jitomate, sin embargo, se requieren hacer modificaciones para poder tener resultados más precisos, como el número de plantas por cuadrante y siendo una de las más importantes el cuidado y monitoreo de la humedad del suelo.

7.7.3.8 La presencia de microorganismos promueve la concentración de clorofila A en un 65% y de la clorofila B en un 46%

Los resultados obtenidos para clorofila A y B presente en las plantas de jitomate cultivadas en cada uno de los sustratos se muestran en la Tabla 17. La mayor

concentración de clorofila A, se observó en las plantas de jitomate cultivadas en CARRH cuyo valor fue un 36.7% mayor con respecto al valor de clorofila presente en el jitomate cultivado en tierra (CT), mientras que las plantas cultivadas en CT, CBRRH, ARRH y BRRH se mantuvieron valores similares de clorofila A. En cuanto a las muestras cultivadas en CARRH y CBRRH estériles se observó en ambos casos una reducción de al menos un 65% con respecto a CT.

El contenido de la clorofila B presente en las plantas de jitomate mostró un comportamiento similar al de clorofila A, para los cultivos de jitomate en CT, CARRH, CBRRH, ARRH y BRRH no se observaron diferencias significativas. Nuevamente para las plantas de jitomate la cantidad de clorofila B presente cuando se utilizaron las mezclas CARRH y CBRRH estériles, provocó la reducción de al menos un 46% con respecto a CT. Por consecuencia los resultados sugieren que la concentración de ambos pigmentos no está relacionada con los nutrientes presentes en el sustrato, pero si está ligada a la presencia de microorganismos (Anwer & Rahman, 2013).

Reportes en la literatura indican valores diversos de ambos pigmentos, entre los cuales se pueden encontrar 3 mg/g clorofila A, 4 mg/g clorofila B (Khattabi, et al., 2023), 12 mg/g clorofila A, 3.5 mg/g clorofila B (Pesko, et al., 2016), 8 mg/g Clorofila A, 6 g/mg clorofila B (Arenas & Hinojosa, 2015). Los resultados obtenidos de clorofila A para las plantas de jitomate cultivadas en presencia de microorganismos utilizando RRH compostados se encuentran 2.41 veces por encima de lo reportado por Khattabi, et al. (2023) , y para aquellas cultivadas en CARRH su valor se encuentra cercano a lo reportado (Arenas & Hinojosa, 2015), sin embargo los valores de clorofila de este estudio están 1.66 veces por debajo a lo reportado por Pesko, et al. (2016). En cuanto a la clorofila B todos los resultados se encuentran por debajo de todos los reportados en la literatura.

La clorofila A es el principal pigmento encargado del proceso de la fotosíntesis, mientras que la clorofila B es un pigmento cuya función es recolectar la energía necesaria para la clorofila A (Panawala, 2017). Por lo tanto, la deficiencia de clorofila B se puede deber a la falta de luz o de energía durante el crecimiento de las plantas

por tanto se sugiere para ensayos futuros controlar los periodos de luz y oscuridad en el crecimiento del jitomate, así como la intensidad de la misma, ya que dichos ensayos fueron realizados a T.A. y bajo periodos de luz natural y oscuridad en el semestre enero-junio de 2024.

Tabla 17 Concentración de clorofila A y B de las plantas de jitomate cultivadas en cada uno de los sustratos.

Sustrato	Concentración de clorofila A (mg/g de hoja)	Concentración de clorofila B (mg/g de hoja)
CRRH	0 ± 0^c	0 ± 0^d
CT	5.294 ± 1.438^a	$1.824 \pm 0.564^{a,b}$
CARRH	7.242 ± 0.354^a	1.993 ± 0.276^a
CBRRH	5.732 ± 0.341^a	$1.839 \pm 0.426^{a,b}$
CARRH estéril	$1.903 \pm 0.117^{b,c}$	$0.839 \pm 0.203^{c,d}$
CBRRH estéril	2.674 ± 0.275^b	$0.991 \pm 0.120^{b,c}$
ARRH	5.622 ± 0.805^a	$1.722 \pm 0.176^{a,b}$
BRRH	5.353 ± 1.059^a	$1.589 \pm 0.257^{a,b,c}$

Los resultados obtenidos en todos los experimentos indican entonces que la mejor opción es realizar el compostaje del RRH en lugar de usarlo sin compostar, ya que, si este paso se omite, la cantidad de RRH usada será indirectamente proporcional al crecimiento de las plantas. Así mismo el mejor sustrato en este estudio para el crecimiento de jitomate fue CARRH ya que mostró los mejores resultados en los parámetros evaluados como tiempo de germinación, número de hojas reales, contenido de humedad, tamaño de raíz, tamaño de tallo y concentración de clorofila A. En la Fig. 54 se muestran las plántulas de jitomate tras 35 días de crecimiento en composta alta CARRH.



Fig. 54 Plántulas de jitomate en composta alta a los 35 días de crecimiento

Así mismo se sugieren las siguientes mejoras para estudios futuros:

- Es necesario realizar una medición de la relación C/N en los sustratos utilizados, se sugiere utilizar una relación 20:1 y generar un diseño experimental con diferentes relaciones C/N en la elaboración de la composta con el fin de evaluar su efecto en el crecimiento del jitomate.
- Se recomienda determinar los nutrientes presentes en la composta que enriquece el sustrato, además de utilizar diferentes concentraciones de RRH para establecer la cantidad de RRH que promueva el óptimo crecimiento de las plantas.
- Es ideal también realizar diferentes pruebas al suelo como la conductancia, compactación, retención de agua, oxigenación para obtener información de como es que el RRH y la composta modifican estos parámetros que son importantes en el crecimiento de las plantas.

- Se recomienda enriquecer el sustrato de la composta con diversas fuentes de nitrógeno (residuos agroindustriales o sales nitrogenadas) para analizar el desarrollo de las plantas de jitomate.
- Se recomienda estandarizar el pH inicial para el cultivo de las plantas evitando de esta manera que esta sea una variable en los ensayos.
- Se recomienda realizar el trasplante hacia contenedores más grandes y llegar hasta la etapa de cosecha y post cosecha para evaluar la calidad nutrimental de los frutos obtenidos y de esta manera obtener información sobre el efecto de la composta en los frutos finales.
- Se recomienda realizar un conteo de UFC de los microorganismos presentes en el sustrato para el cultivo de jitomate.
- Se recomienda estandarizar la humedad del suelo en el que las plantas crecen y la cantidad de agua y frecuencia de riego.

7.8 El cumplimiento de los ODS y la implementación de la economía circular

En el presente proyecto se demostró que fue posible implementar un proceso de economía circular a escala piloto para el aprovechamiento del bagazo de malta durante el cultivo de los hongos comestibles del género *Pleurotus*, además de aprovechar un segundo residuo como fue el RRH para la obtención de enzimas, así como para la biorremediación de colorantes utilizados en la industria textil, dicho residuo se puede aprovechar adicionalmente como se mostró en este trabajo para hacer una composta que promueve el crecimiento de la planta de jitomate.

De esta manera se cumplió con al menos 9 de 17 de los ODS planteados por la ONU los cuales son: Hambre cero; Salud y bienestar; Agua limpia y saneamiento; Trabajo decente y crecimiento económico; Industria, innovación e infraestructura; Ciudades y comunidades sostenibles; Producción y consumo responsables; Vida submarina; Vida de ecosistemas terrestres.

VIII. Conclusiones

Los experimentos a escala laboratorio permiten establecer la relación óptima de bagazo de malta: rastrojo de maíz, para el crecimiento de los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* con base en los parámetros productivos: eficiencia biológica; periodo productivo; tasa productiva; rendimiento. Siendo la proporción de 86% bagazo de malta con 14% de rastrojo de maíz la relación que permite obtener los mejores resultados.

El cambio hacia una escala piloto fue posible y permite aprovechar espacios que anteriormente no eran utilizados. Dicho escalamiento permite diseñar un invernadero que mantiene estables las condiciones operacionales para el crecimiento de los hongos del género *Pleurotus*, como la humedad relativa entre 81% - 85%. En este trabajo se establece un sistema automatizado que permite controlar dicha variable a lo largo del día de forma ininterrumpida.

Es posible procesar 63.5 kg de bagazo de malta de la industria cervecera con el sistema piloto implementado para el crecimiento de hongos, a lo largo de 68 días con un consumo de agua de 1.04 litros y un gasto energético de 240 W, ambos por día.

El cambio de escala tiene un efecto en los parámetros productivos de forma positiva al incrementar cada uno de ellos al menos 141%.

El mejor hongo para el cultivo a una escala piloto con las condiciones establecidas es *P. ostreatus*, sin embargo, esto no significa que no sea viable el cultivo del hongo *P. djamor* que también tuvo buenos resultados al momento de comparar con lo reportado en la literatura.

La relación de bagazo de malta de 86% y 14% rastrojo de maíz para el cultivo de los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor* tiene un efecto en su calidad nutrimental, y permite acumular la mayor cantidad de proteínas en el cuerpo fructífero con respecto a las demás proporciones propuestas, así mismo dichos cuerpos fructíferos son los que

menor cantidad de carbohidratos presentan en su matriz, además de mantener la cantidad de fibra, lípidos, antioxidantes y cenizas. Debido a sus características nutrimentales y altas concentraciones de proteínas este hongo puede ser de interés nutricional para la población en general.

El análisis proximal para *P. ostreatus* y *P. djamor* cultivados a escala piloto es el siguiente: proteínas 0.3455 ± 0.0148 y 0.3518 ± 0.0062 g / g muestra seca, respectivamente; carbohidratos 0.3435 ± 0.0274 y 0.3709 ± 0.019 g / g muestra seca, respectivamente; fibra cruda 0.1095 ± 0.0028 y 0.1724 ± 0.0119 g / g muestra seca, respectivamente; lípidos 0.0345 ± 0.0080 y 0.0186 ± 0.0055 g / g muestra seca, respectivamente; cenizas 0.0345 ± 0.0425 y 0.0869 ± 0.0111 g / g muestra seca, respectivamente; fenoles totales 2.2100 ± 0.1512 y 2.1723 ± 0.1771 mg eq ác. gálico / g muestra seca, respectivamente.

Las enzimas recuperadas con actividad de amilasa parecen depender de la cantidad de almidón restante en el bagazo utilizado para cultivar los hongos. La mayor actividad enzimática presente en los extractos crudos corresponde a las lacasas, sin embargo, la actividad fue de 62% y 51% menor para *P. ostreatus* y *P. djamor* tras el proceso de escalamiento.

Los extractos crudos enzimáticos poseen la capacidad de decolorizar el azul de bromofenol en un $91.75\% \pm 1.50\%$ a 32°C sin agitación al utilizar una relación 40% extracto crudo enzimático: 60% colorante y agua de la llave como buffer de extracción tras el cultivo de *P. ostreatus*.

Para rojo Congo el porcentaje de decoloración es $90.68\% \pm 3.39\%$ a 32°C , sin agitación y una relación 50% extracto crudo enzimático: 50% colorante utilizando citrato de sodio como buffer de extracción tras el cultivo de *P. djamor*.

El agua de la llave como buffer de extracción de enzimas es viable y es benéfico por la cantidad de minerales que esta contiene y que pueden actuar como cofactores además de ser una opción más factible para economizar el proceso de extracción pensando en un futuro escalamiento.

El uso de extracto crudo enzimático igual o por debajo al 50% en proporción promueve los procesos de degradación enzimática del colorante, mientras que por encima de dicha concentración el fenómeno que se promueve es la bioadsorción.

Los espectros de ambos colorantes al tiempo 0 y tras el tratamiento enzimático sugieren que la decoloración permite la descomposición de los colorantes a moléculas de menor tamaño dado a que no hay presencia de nuevos picos, sin embargo, es necesario realizar estudios de espectrometría de masas para corroborar que moléculas son las que se forman tras la acción enzimática.

Los análisis de actividad de lacasas con respecto al tiempo indican que estas enzimas no son las únicas implicadas en el proceso de decoloración del azul de bromofenol y el rojo Congo, reportes en la literatura indican también que para dichos procesos es mejor utilizar extractos crudos enzimáticos en lugar de enzimas purificadas.

Los resultados en el sistema de hidroponía en el uso del RRH como suplemento de suelos para el crecimiento de jitomate indican que el RRH en una baja concentración (14.218 g/L de tierra) conlleva a un incremento del 84.81% en el tamaño de la raíz además de mantener otros parámetros como el número de hojas y porcentaje de germinación semejantes a los valores del control, pero afectando en un 14% el tamaño del tallo.

El estudio en tierra sugiere que el uso de composta producida a partir de RRH en una alta concentración (28.571 g/L de tierra) es la mejor alternativa para el cultivo de jitomate ya que promueve la germinación y reduce el tiempo en un 37.5%, aumenta el número de hojas reales en un 82%, incrementa el contenido de agua de las plantas en un 14%, siendo similar a los niveles óptimos reportados en la literatura e incrementa el tamaño de la raíz en un 300%, incrementa también el tamaño del tallo en un 94% y la producción de clorofila A en un 37%.

La presencia de microorganismos como *Trichoderma spp.* y *Aspergillus niger* en el sustrato de cultivo del jitomate es importante ya que cuando estos no se encuentran se reduce en un 57% el porcentaje de germinación, así mismo la presencia de

microorganismos tiene un efecto directo en la producción de clorofila A y B ya que cuando no están presentes la clorofila disminuye en un 65% y un 46%, respectivamente.

Con este proyecto es posible cumplir con al menos 9 de los 17 ODS establecidos por la ONU además de obtener 3 bioproductos (hongos comestibles *P. ostreatus* y *P. djamor* producidos a escala piloto, extractos crudos enzimáticos con aplicaciones biotecnológicas y de biorremediación como decoloración de colorantes usados en la industria textil y producción de composta para el cultivo de plantas) a partir del bagazo de malta que en muchas ocasiones es desechado como un residuo más, promoviendo de esta manera la economía circular en la cervecería local.

IX. Perspectivas

Realizar la estructura del invernadero con material de soporte más resistente, cambiar el plástico de recubrimiento por acrílico, distribuir a lo largo los tubos que proveen de neblina al invernadero para alcanzar una mejor y más rápida distribución de esta además de medir variables como niveles de CO₂, luz, incluir un sistema de inserción y extracción de aire.

Realizar la medición de la relación C/N en el sustrato empleado para el crecimiento de los hongos *P. ostreatus* y *P. djamor*, además de realizar experimentos suplementándolo con diferentes fuentes de nitrógeno, ya sea de algún otro residuo agroindustrial o empleando diferentes fuentes como urea, amonio, nitratos, etc. Con el fin de poder obtener la relación óptima incrementando así los parámetros EB, TP y rendimiento, así como analizar el efecto que esto tendría en los nutrientes presentes en los cuerpos fructíferos.

Realizar análisis proximales a los sustratos empleados para determinar como es que los nutrientes presentes en estos afectan a los de los cuerpos fructíferos generados, así como también medir la conductividad eléctrica de los sustratos.

Realizar análisis de minerales tanto de los sustratos empleados como de los cuerpos fructíferos obtenidos.

Realizar experimentos con diferentes diseños de reactor aparte de su forma cilíndrica y con diferentes medidas o relaciones de altura: diámetro en caso de seguir experimentando con conformaciones cilíndricas.

Realizar variaciones en la cantidad de micelio empleado para la colonización de los sustratos en ambos hongos con el fin de determinar la cantidad óptima en cuanto a rendimientos, economía e impacto ambiental.

Realizar recuperación de esporas de los hongos con mejores rendimientos para poder desarrollar una cepa que sea afín a la mezcla de sustratos que se está utilizando.

Realizar experimentos con más residuos agroindustriales de diferente origen.

Determinar la presencia de almidón remanente en el sustrato con el fin de estudiar como es que ésta afecta a la actividad enzimática de las amilasas recuperadas en los extractos crudos enzimáticos.

Realizar cinéticas de la actividad enzimática de cada una de las enzimas propuestas desde el inicio de la colonización del hongo hasta 3 meses después de la última fructificación con el fin de recabar información sobre como es que la actividad enzimática varia conforme el tiempo y establecer el tiempo de extracción durante su cultivo.

Emplear diferentes tecnologías de extracción de enzimas como el ultrasonido.

Suplementar el sustrato con azúcares reductores y cobre para promover la generación de enzimas y la actividad de estas.

Determinar la cantidad de lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en los sustratos utilizados para el cultivo de los hongos.

Realizar la medición de actividad enzimática de tirosinasas, peroxidasas, polifenol oxidasas entre otras enzimas que tengan la actividad de oxidasas, además de purificarlas y estudiar el mecanismo de la degradación de los colorantes azul de bromofenol y rojo Congo.

Implementar el uso de cofactores como el sulfato de cobre 2 mM como inductor de lacasas y enzimas desde la etapa de siembra para analizar como es que la presencia de dichos cofactores favorece la producción de enzimas y los parámetros de rendimiento, EB, TP y PP del hongo.

Implementar el uso de cofactores como el Zinc y el Magnesio que promueven la actividad de enzimas como xilanasas.

Implementar el uso de mediadores en las reacciones de decoloración con el fin de obtener mayores porcentajes de decoloración y reducir el tiempo.

Evaluar el aprovechamiento del RRH para la recuperación de antioxidantes, producción de biomateriales, alimento para ganado o cultivo de otros hongos.

Realizar el análisis de minerales del agua de la llave, así como de otras características como pH, conductividad, etc.

Evaluar el crecimiento de diferentes microorganismos en el RRH que puedan actuar como degradadores secundarios.

Aprovechar el RRH como matriz o sustrato para el cultivo de otros hongos como *Trichoderma spp.* que puedan ser utilizados como control biológico

Realizar mediciones de la relación C/N en la composta obtenida a partir del RRH en las diferentes concentraciones además de suplementar el RRH con alguna fuente de nitrógeno ya sea de algún agro residuo o bien empleando alguna sal con nitrógeno, y determinar relación C/N óptima para el compostaje.

Realizar pruebas a la composta obtenida y en las mezclas de RRH con suelo de conductancia, compactación, retención de agua y oxigenación para elucidar su efecto durante el desarrollo vegetal.

Realizar pruebas de parámetros como ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, conductancia eléctrica, aireación, materia orgánica, cantidad de fósforo, entre otros más que indiquen la viabilidad de este producto.

Realizar pruebas y procedimientos para utilizar la composta obtenida para el cultivo del hongo *Agaricus bisporus*.

Estandarizar el pH inicial para el cultivo de las plantas evitando de esta manera que esta sea una variable.

Realizar el trasplante de las plantas de jitomate a contenedores más grandes y llegar hasta la etapa de cosecha y post cosecha para evaluar la calidad nutrimental de los frutos obtenidos y de esta manera obtener información sobre el efecto de la composta en los frutos finales.

Realizar un conteo de UFC de los microorganismos presentes en el sustrato para el cultivo de jitomate.

Estandarizar la humedad del suelo en el que las plantas crecen, la cantidad de agua y frecuencia de riego.

X. Bibliografía

1. Abdelkader, M. M., Gaplaev, M. S., Terekbaev, A. A., & Puchkov, M. Y. (2021). The Influence of Biostimulants on Tomato Plants Cultivated under Hydroponic Systems. *Journal of Horticultural Research*, 29(2), 107–116. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0012>
2. Afreen, S., Shamsi, T. N., Baig, M. A., Ahmad, N., Fatima, S., Qureshi, M. I., Hassan, Md. I., & Fatma, T. (2017). A novel multicopper oxidase (laccase) from cyanobacteria: Purification, characterization with potential in the decolorization of anthraquinonic dye. *PLOS ONE*, 12(4), e0175144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175144>
3. Afsar, M., Zia, A., Us Salam, M. B., Ahmad, M. N., Khan, A. A., Ul Haq, T., Aziz, T., & Alasmari, A. F. (2024). A multifaceted analysis of spent mushroom substrate of selected oyster mushrooms for enzymatic activity, proximate composition, and antimicrobial activity. *Italian Journal of Food Science*, 36(1), 165–174. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v36i1.2457>
4. Agostinho, B. C., Daniel, J. L. P., Zeoula, L. M., Alcalde, C. R., Machado, E., Bragatto, J. M., Schneider, C. R., Santos, N. W., Matumoto-Pintro, P. T., Saraiva, B. R., Osorio, J. A. C., & Faciola, A. P. (2021). Enzymatic effects of *Pleurotus ostreatus* spent substrate on whole-plant corn silage and performance of lactating goats. *Journal of Dairy Science*, 104(11), 11660–11672. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20775>
5. Ahmed, T., Noman, M., Qi, Y., Shahid, M., Hussain, S., Masood, H. A., Xu, L., Ali, H. M., Negm, S., El-Kott, A. F., Yao, Y., Qi, X., & Li, B. (2023). Fertilization of Microbial Composts: A Technology for Improving Stress Resilience in Plants. *Plants*, 12(20), 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>
6. Ahn, H. K., Richard, T. L., & Glanville, T. D. (2008). Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials. *Waste Management*, 28(8), 1411–1416. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.05.022>

7. Ali Al-Shebly, H. A. (2022a). Effect of *Aspergillus flavus* on Seed Germination and Seedlings Growth of Barley and Some of Associated Weeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060(1), 012119.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012119>
8. Ali Al-Shebly, H. A. (2022b). Effect of *Aspergillus flavus* on Seed Germination and Seedlings Growth of Barley and Some of Associated Weeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060(1), 012119.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012119>
9. Aliyu, S., & Bala, M. (2011). Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. *African Journal of Biotechnology*, 10(3), 324–331.
10. Amery, F., Vandaele, E., Körner, I., Loades, K., Viaene, J., Vandecasteele, B., & Willekens, K. (2020). *Compost quality indicators*.
11. Anwer, A., & Khan, M. (2013). *Aspergillus niger* as tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality enhancer and plant health promoter. *Journal of Postharvest Technology*, 01(01), 36–51.
12. Anyanwu, J. O., Oguzie, K. L., Ogbulie, T. E., Akalezi, C. O., & Oguzie, E. E. (2023). Electrochemical and microbial treatment of bromophenol blue dye in aqueous solution. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*.
<https://doi.org/10.5599/jese.1882>
13. Ardón, C. (2004). *EVALUACIÓN DE PERICARPIO DE JACARANDA (Jacaranda mimosaeifolia) Y PASTO ESTRELLA AFRICANA (Cynodon plectostachyus), PARA EL CULTIVO ARTESANAL DEL HONGO OSTRA (Pleurotus ostreatus, Ecosur-0112)* [tesis de licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala .
14. Arenas, B., & Hinojosa, J. (2015). *ANÁLISIS DE LA RESPUESTA FISIOLÓGICA EN PLANTAS DE JITOMATE (Lycopersicon esculentum) SOMETIDAS A ESTRÉS ABIÓTICO* [tesis de licenciatura]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
15. Aroh, K. (2019). Review: Beer Production. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3458983>

16. Ascenza. (2024, March 29). *Tomate*. Tomato.
https://web.archive.org/web/202400000000000*/https://ascenza.mx/es/resources/tomate
17. Asses, N., Ayed, L., Hkiri, N., & Hamdi, M. (2018). Congo Red Decolorization and Detoxification by *Aspergillus niger*: Removal Mechanisms and Dye Degradation Pathway. *BioMed Research International*, 2018, 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2018/3049686>
18. Association of Official Analytical Chemists. (1990). Determination of Ash in Animal feed by Drying. In H. Kenneth (Ed.), *Official Methods of Analysis* (15th ed., pp. 69–88). Official Methods of Analysis.
19. Astija, Anggy Rizky Januarista, Vita Indri Febriani, & Lestari MP Alibasyah. (2022). The effect of soil pH on a carbohydrate level of tomato fruits (*Lycopersicum esculentum* Mill.) from bobo and Sidera villages. *GSC Advanced Research and Reviews*, 12(1), 001–004. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.12.1.0169>
20. Aziz, L., Hamayun, M., Rauf, M., Iqbal, A., Arif, M., Husssin, A., & Khan, S. A. (2021). Endophytic *Aspergillus niger* reprograms the physicochemical traits of tomato under cadmium and chromium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 186, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104456>
21. Azoulay, A., Garzon, P., & Eisenberg, M. J. (2001). Comparison of the mineral content of tap water and bottled waters. *Journal of General Internal Medicine*, 16(3), 168–175. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1497.2001.04189.x>
22. Babu, D. R., Pandey, M., & Rao, G. N. (2014). Antioxidant and electrochemical properties of cultivated *Pleurotus* spp. and their sporeless/low sporing mutants. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11), 3317–3324.
<https://doi.org/10.1007/s13197-012-0822-9>
23. Bakratsas, G., Samiotaki, M., Katapodis, P., & Stamatis, H. (2024). Proteomic Analysis of *Pleurotus ostreatus* Grown on Glucose and Xylose Mixtures in Submerged Fermentation Provides Insights into Differentiated Mycelial Composition. *Synthetic Biology and Engineering*, 2(1), 10006–10006.
<https://doi.org/10.35534/sbe.2024.10006>

24. BarthHass GmbH & Co. KG. (2023). *BarthHaas Report 2022/2023*.
25. Bedő, S., Rozbach, M., Nagy, L., Fehér, A., & Fehér, C. (2021). Optimised Fractionation of Brewer's Spent Grain for a Biorefinery Producing Sugars, Oligosaccharides, and Bioethanol. *Processes*, 9(2), 366.
<https://doi.org/10.3390/pr9020366>
26. Bedoya-Cataño, J. F., Ramón-Palacio, C., Gil-Garzón, M. A., & Ramírez-Sánchez, C. (2022). Extracción de antioxidantes de los arándanos (*Vaccinium corymbosum*): efecto de solventes verdes sobre polifenoles totales, capacidad antioxidante y comportamiento electroquímico. *TecnoLógicas*, 25(53), e2277.
<https://doi.org/10.22430/22565337.2277>
27. Beerlabteam. (2020, January 31). *LA REUTILIZACIÓN RESPONSABLE DE RESIDUOS CERVECEROS*. Beerlabs.
28. Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maieves, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P. S., Júnior, A. M., & Ribani, R. H. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
29. Berman, R. (2023, April 24). *A daily dose of blueberries could improve brain and heart health*. Medical News Today.
30. Bettin, F., Cousseau, F., Martins, K., Zaccaria, S., Girardi, V., Silveira, M. M. da, & Dillon, A. J. P. (2019). Effects of pH, Temperature and Agitation on the Decolourisation of Dyes by Laccase-Containing Enzyme Preparation from *Pleurotus sajor-caju*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62.
<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180338>
31. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
32. Bradley, P. (2023, December 2). *Starting Seedlings in Hydroponics*. Progressive Growth Garden Supply & Hydroponics.

33. Briggs, D., Boulton, C., Brookes, P., & Stevens, R. (2004). Water, Effluents and wastes. In *Brewing Science and Practice* (1st ed., pp. 52–82). Woodhead Publishing Limited.
34. Butré, C. I., Wierenga, P. A., & Gruppen, H. (2014). Influence of water availability on the enzymatic hydrolysis of proteins. *Process Biochemistry*, 49(11), 1903–1912. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.08.009>
35. Cabra Cendales, T., Rodríguez González, C. A., Villota Cuásquer, C. P., Tapasco Alzate, O. A., & Hernández Rodríguez, A. (2017). Bacillus effect on the germination and growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), 37. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.57375>
36. Campos, C. (2022, January 31). Monterrey identifica 188 tiraderos de basura clandestinos en el centro. *ABC Noticias*.
37. Campos, H., Trejo, C., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Víctor Conde-Martínez, F., & Cruz-Ortega, R. (2020). Water availability effects on germination, membrane stability and initial root growth of Agave lechuguilla and A. salmiana. *Flora*, 268, 151606. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151606>
38. Cargua Catagña, F. E., Rodríguez Llerena, M. V., Damián Carrión, D. A., Recalde Moreno, C. G., & Santillán Lima, G. P. (2017). Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park-Ecuador. *Acta Agronómica*, 66(3), 408–413. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.52467>
39. Carlini, M., Monarca, D., Castellucci, S., Mennuni, A., Casini, L., & Selli, S. (2021). Beer spent grains biomass for biogas production: Characterization and anaerobic digestion-oriented pre-treatments. *Energy Reports*, 7, 921–929. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.049>
40. CARMO, C. O. do, RODRIGUES, M. D. S., SILVA, F. da, IRINEU, T. G. M., & SOARES, A. C. F. (2021). SPENT MUSHROOM SUBSTRATE of *Pleurotus ostreatus* KUMMER INCREASES BASIL BIOMASS AND ESSENTIAL OIL YIELD. *Revista Caatinga*, 34(3), 548–558. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n306rc>

41. Carter, A. (2023, February 23). *Can D-Mannose Treat or Prevent UTIs?* Healthline.
42. Castillo, L., & Martínez, L. (2022). *Potencial biotecnológico de residuos cervecedores para el cultivo y obtención de enzimas extracelulares de Pleurotus ostreatus y Pleurotus djamor* [tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
43. Castro, R. (2022, August 24). *La cerveza aporta 1.5% del PIB de México*. Fortuna Negocios y Finanzas.
44. Celis-Perera, S. E., Cristóbal-Alejo, J., Reyes-Ramírez, A., Garruña-Hernández, R., Tun-Suarez, J. M., & Gamboa-Angulo, M. (2022). Trichoderma asperellum Ta13-17 in the growth of Solanum lycopersicum and biocontrol of Corynespora cassiicola. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 41(1). <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2207-1>
45. Chauhan, R. (2019). Nitrogen sources and trace elements influence Laccase and peroxidase enzymes activity of Grammothele fuligo. *Vegetos*, 32(3), 316–323. <https://doi.org/10.1007/s42535-019-00049-w>
46. Chauhan, S., Yadav, D., Kumar, S., Kumar, R., & Kumar, A. (2023). Effect of Calcium on the Growth and Yield of Tomato (Solanum lycopersicum L.) . *Biological Forum – An International Journal*, 15(10), 1162–1166.
47. Chirinang, P., & Intarapichet, K.-O. (2009). Amino acids and antioxidant properties of the oyster mushrooms, Pleurotus ostreatus and Pleurotus sajor-caju. *ScienceAsia*, 35(4), 326–331. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.326>
48. Choudhury, M., Rahman, T., Kakon, A., Hoque, N., Akhtaruzzaman, M., Begum, M., Choudhuri, M., & Hossain, M. (2013). Effects of Pleurotus ostreatus on Blood Pressure and Glycemic Status of Hypertensive Diabetic Male Volunteers. *Bangladesh Journal of Medical Biochemistry*, 6(1), 5–10. <https://doi.org/10.3329/bjmb.v6i1.13280>
49. Cogger, C. G. (2005). Potential Compost Benefits for Restoration Of Soils Disturbed by Urban Development. *Compost Science & Utilization*, 13(4), 243–251. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702248>

50. Coherent Market Insights. (2023, April 22). *Cellulase Market Analysis*. Coherent Market Insights.
51. Contato, A. G., Inácio, F. D., Brugnari, T., Araújo, C. A. V. de, Maciel, G. M., Haminiuk, C. W. I., Peralta, R. M., & Souza, C. G. M. de. (2020). Solid-state fermentation with orange waste: optimization of Laccase production from *Pleurotus pulmonarius* CCB-20 and decolorization of synthetic dyes. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 42, e52699.
<https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v42i1.52699>
52. Cooper, T. E., Teng, C., Howell, M., Teixeira-Pinto, A., Jaure, A., & Wong, G. (2022). D-mannose for preventing and treating urinary tract infections. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2022(8).
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD013608.pub2>
53. Cortazar, A., González, C., Coronel, C., Escalante, J., Castro, J., & Villagómez, J. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y Ciencia*, 28(2), 187–199.
54. D'Agostini, É. C., Mantovani, T. R. D., Valle, J. S. do, Paccola-Meirelles, L. D., Colauto, N. B., & Linde, G. A. (2011). Low carbon/nitrogen ratio increases laccase production from basidiomycetes in solid substrate cultivation. *Scientia Agricola*, 68(3), 295–300. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000300004>
55. Dani, R. (2021, February 20). *Global Amylases Market*. DataIntelo.
56. Daughton, C. G. (2004). Non-regulated water contaminants: emerging research. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7–8), 711–732.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.003>
57. de Jesús-Rivera, L., Álvarez-Sánchez, M. E., Ramírez-Pérez, F., Maldonado-Torres, R., & Bandala-Muñoz, V. M. (2022). Uso potencial de las glóquidas de tuna como sustrato para la producción de micelio de *Pleurotus* sp. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(6), 991–1002.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i6.3310>
58. Devi, S., Prabhu, N., Monika, S., Swapna, N., Vaishali, S., & Gajendran, T. (2020). Sequestration and purification of essential enzyme from *Pleurotus florida* compost

- waste and its application studies. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 8(1), 64–68. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80111>
59. Devolli, A., Shahinasi, E., Stafasani, M., Feta, D., & Dara, F. (2018). Evaluation of brewery waste and its reduction methods . *Albanian Journal of Agricultural Science*, 17(special issue), 506–514.
 60. Diaz-Pérez, J. C., Shackel, K. A., & Sutter, E. G. (1995). Relative water content and water potential of tissue 1. *Journal of Experimental Botany*, 46(1), 111–118. <https://doi.org/10.1093/jxb/46.1.111>
 61. Ding, Z., Chen, Y., Xu, Z., Peng, L., Xu, G., Gu, Z., Zhang, L., Shi, G., & Zhang, K. (2014). Production and characterization of laccase from *Pleurotus ferulae* in submerged fermentation. *Annals of Microbiology*, 64(1), 121–129. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0640-y>
 62. Doctrow, B. (2023, September 26). *Immune response to eating chitin linked to better health*. National Institutes of Health.
 63. Drost, D. (2020, May). *How to Grow Tomatoes in Your Garden*. Utah State University.
 64. Duddek, P., Ahmed, M. A., Javaux, M., Vanderborght, J., Lovric, G., King, A., & Carminati, A. (2023). The effect of root hairs on root water uptake is determined by root–soil contact and root hair shrinkage. *New Phytologist*, 240(6), 2484–2497. <https://doi.org/10.1111/nph.19144>
 65. Duruoha, C., Piffer, C. R., & Silva, P. A. (2007). CORN ROOT LENGTH DENSITY AND ROOT DIAMETER AS AFFECTED BY SOIL COMPACTION AND SOIL WATER CONTENT. *IRRIGA*, 12(1), 14–26. <https://doi.org/10.15809/irriga.2007v12n1p14-26>
 66. Echo. (2023, October 2). *Factores que influyen en la germinación de semillas*. Echo Community.
 67. Economou, C. N., Philippoussis, A. N., & Diamantopoulou, P. A. (2020). Spent mushroom substrate for a second cultivation cycle of *Pleurotus* mushrooms and dephenolization of agro-industrial wastewaters. *FEMS Microbiology Letters*, 367(8). <https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa060>

68. Effiong, M. E., Umeokwochi, C. P., Afolabi, I. S., & Chinedu, S. N. (2024). Comparative antioxidant activity and phytochemical content of five extracts of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom). *Scientific Reports*, 14(1), 3794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54201-x>
69. Eichlerová, I., Homolka, L., & Nerud, F. (2006). Ability of industrial dyes decolorization and ligninolytic enzymes production by different *Pleurotus* species with special attention on *Pleurotus calypttratus*, strain CCBAS 461. *Process Biochemistry*, 41(4), 941–946. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.018>
70. el Economista. (2022, November 5). ¡Salud! La producción de cerveza mexicana está en niveles récord. *El Economista*.
71. el informador. (2019, May 14). Zapopan encabeza tiraderos clandestinos en el Estado. *Informador MX*.
72. el Khattabi, O., el Hasnaoui, S., Toura, M., Henkrar, F., Collin, B., Levard, C., Colin, F., Merghoub, N., Smouni, A., & Fahr, M. (2023). Seaweed extracts as promising biostimulants for enhancing lead tolerance and accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied Phycology*, 35(1), 459–469. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02849-1>
73. el sol de San Luis. (2022, September 30). De canchas de futbol a tiradero de basura: así afectan a las personas los vertederos en SLP. *El Sol de México*.
74. el universal. (2018, June 1). Habitantes de Peñasco temen implementación de tiradero tóxico. *El Universal San Luis Potosí*.
75. Elkanah, F. A., Oke, M. A., & Adebayo, E. A. (2022). Substrate composition effect on the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (MK751847) fruiting body. *Heliyon*, 8(11), e11841. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11841>
76. Europa Press Ciencia. (2022, November 21). *Las raíces de las plantas crecen solo cuando hay humedad*. Europapress.
77. Evyan, Y., Michlyn, C., Vikneswary, S., & Chong, M. (2021). Absorption efficiency of Bromophenol Blue and Congo Red using King oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*). *Current Research in Environmental & Applied Mycology*, 11(1), 294–304. <https://doi.org/10.5943/cream/11/1/22>

78. Familoni, T. V., Ogidi, C. O., Akinyele, B. J., & Onifade, A. K. (2018). Evaluation of yield, biological efficiency and proximate composition of *Pleurotus* species cultivated on different wood dusts. *Czech Mycology*, 70(1), 33–45.
<https://doi.org/10.33585/cmy.70102>
79. Follmer, C. M., Hummes, A. P., Lângaro, N. C., Petry, C., Moterle, D. F., & Bortoluzzi, E. C. (2021). Nutrient availability and pH level affect germination traits and seedling development of *Conyza canadensis*. *Scientific Reports*, 11(1), 15607. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95164-7>
80. Fontalvo, J., Morales, L., Vilis, I., Jarri, L., Alfonso, J., & Acosta, J. (2021). Cultivo de jitomate solanum lycopersicum Familia: Solanaceae. In *Universidad Veracruzana*. Universidad Veracruzana.
81. Fos-Codoner, F. S., Bouwman, L. M. S., Keijer, J., & van Schothorst, E. M. (2023). Dietary Galactose Increases the Expression of Mitochondrial OXPHOS Genes and Modulates the Carbohydrate Oxidation Pathways in Mouse Intestinal Mucosa. *The Journal of Nutrition*, 153(12), 3448–3457.
<https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.10.011>
82. Future Market Insights. (2023a, January 27). *Cellulose Fiber Market*. Future Market Insights.
83. Future Market Insights. (2023b, June 4). *Xylanase Market*. Future Market Insights.
84. Garber, J. M., Hennet, T., & Szymanski, C. M. (2021). Significance of fucose in intestinal health and disease. *Molecular Microbiology*, 115(6), 1086–1093.
<https://doi.org/10.1111/mmi.14681>
85. Garcés-Ayerbe, C., Rivera-Torres, P., Suárez-Perales, I., & Leyva-de la Hiz, D. I. (2019). Is It Possible to Change from a Linear to a Circular Economy? An Overview of Opportunities and Barriers for European Small and Medium-Sized Enterprise Companies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 851. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050851>
86. García, O., Infante, R., & Rivera, C. (2008). Hacia una definición de fibra alimentaria. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 21(1), 25–30.

87. Garuba, T., Abdukkareem, 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>
88. Ge, M., Deng, W., Wang, Z., Weng, C., & Yang, Y. (2024). Effective Decolorization and Detoxification of Single and Mixed Dyes with Crude Laccase Preparation from a White-Rot Fungus Strain *Pleurotus eryngii*. *Molecules*, 29(3), 669. <https://doi.org/10.3390/molecules29030669>
89. González, M. (2017). Los ingredientes. In Lulu Enterprises. - Lulu Press Inc. (Ed.), *Principios de Elaboración de las Cervezas Artesanales* (1st ed., pp. 49–99). Lulu Enterprises. - Lulu Press Inc.
90. Guadarrama, P., & Oropeza, M. (2017). *Productividad y actividad antioxidante de cepas silvestres, reconstituidas e híbridas de pleurotus djamor* [tesis de maestría]. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
91. Günç Ergönül, P., Akata, I., Kalyoncu, F., & Ergönül, B. (2013). Fatty Acid Compositions of Six Wild Edible Mushroom Species. *The Scientific World Journal*, 2013(1). <https://doi.org/10.1155/2013/163964>
92. Gutiérrez, D., Ortiz, C., & Mendoza, A. (2008). Medición de Fenoles y Actividad Antioxidante en Malezas Usadas para Alimentación Animal . *Simposio de Metrología* , 1–5.
93. Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(1), 6087. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>
94. Hasan, M., Khatun, M., Sajib, M., Rahman, M., Rahman, M., Roy, M., Miah, M., & Ahmed, K. (2015). Effect of Wheat Bran Supplement with Sugarcane Bagasse on Growth, Yield and Proximate Composition of Pink Oyster Mushroom (*Pleurotus djamor*) . *American Journal of Food Science and Technology*, 3(6), 150–157. <https://doi.org/10.12691/ajfst-3-6-2>.
95. Hauer, R. J., & Johnson, G. R. (2021). Relationship of structural root depth on the formation of stem encircling roots and stem girdling roots: Implications on tree

- condition. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127031.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127031>
96. Henderickx, M. M. E. L., Stoots, S. J. M., Baard, J., & Kamphuis, G. M. (2023). Could the region you live in prevent or precipitate kidney stone formation due to mineral intake through tap water? An analysis of nine distribution regions in Flanders. *Acta Chirurgica Belgica*, 123(4), 354–361.
<https://doi.org/10.1080/00015458.2022.2025722>
 97. Hernández, D., Ros, M., Carmona, F., Saez-Tovar, J., & Pascual, J. (2021). Composting Spent Mushroom Substrate from *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* Production as a Growing Media Component for Baby Leaf Lettuce Cultivation under *Pythium irregulare* Biotic Stress. *Horticulturae*, 7(2), 13.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7020013>
 98. Hernández, E., Sánchez, C., & Díaz, G. (2017). Production of laccases, cellulases and xylanases of *Pleurotus ostreatus* grown in liquid-state fermentation. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2(2), 169–176.
 99. Ho, A., Sinick, J., Esko, T., Fischer, K., Menni, C., Zierer, J., Matey-Hernandez, M., Fortney, K., & Morgen, E. K. (2019). Circulating glucuronic acid predicts healthspan and longevity in humans and mice. *Aging*, 11(18), 7694–7706.
<https://doi.org/10.18632/aging.102281>
 100. Hoa, H. T., Wang, C.-L., & Wang, C.-H. (2015a). The Effects of Different Substrates on the Growth, Yield, and Nutritional Composition of Two Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*). *Mycobiology*, 43(4), 423–434. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.423>
 101. Hoa, H. T., Wang, C.-L., & Wang, C.-H. (2015b). The Effects of Different Substrates on the Growth, Yield, and Nutritional Composition of Two Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*). *Mycobiology*, 43(4), 423–434. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.423>
 102. Hou, H., Zhou, J., Wang, J., Du, C., & Yan, B. (2004). Enhancement of laccase production by *Pleurotus ostreatus* and its use for the decolorization of

- anthraquinone dye. *Process Biochemistry*, 39(11), 1415–1419.
[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00267-X)
103. Husain, Q. (2006). Potential Applications of the Oxidoreductive Enzymes in the Decolorization and Detoxification of Textile and Other Synthetic Dyes from Polluted Water: A Review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 26(4), 201–221.
<https://doi.org/10.1080/07388550600969936>
 104. Iark, D., Buzzo, A. J. dos R., Garcia, J. A. A., Côrrea, V. G., Helm, C. V., Corrêa, R. C. G., Peralta, R. A., Peralta Muniz Moreira, R. de F., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2019). Enzymatic degradation and detoxification of azo dye Congo red by a new laccase from *Oudemansiella canarii*. *Bioresource Technology*, 289, 121655. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121655>
 105. Ievinsh, G. (2023). Water Content of Plant Tissues: So Simple That Almost Forgotten? *Plants*, 12(6), 1238. <https://doi.org/10.3390/plants12061238>
 106. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Importancia de la industria de la cerveza en las industrias manufactureras. In Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Ed.), *Conociendo la industria de la Cerveza colección de estudios sectoriales y regionales* (1st ed., pp. 7–11). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
 107. Isanapong, J., Suwannoi, K., Lertlattanapong, S., & Panchal, S. (2024). Purification, characterization of laccase from *Pleurotus ostreatus* HK35, and optimization for congo red biodecolorization using Box–Behnken design. *3 Biotech*, 14(3), 73. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-03926-7>
 108. Islam, M., Rahman, M., Bulbul, S., & Alam, M. (2011). EFFECT OF *Trichoderma* ON SEED GERMINATION AND SEEDLING PARAMETERS IN CHILI. *International Journal of Experimental Agriculture*, 2(1), 21–26.
 109. Jaeger, A., Arendt, E. K., Zannini, E., & Sahin, A. W. (2020). Brewer's Spent Yeast (BSY), an Underutilized Brewing By-Product. *Fermentation*, 6(4), 123.
<https://doi.org/10.3390/fermentation6040123>
 110. Jandacek, R. J. (2017). Linoleic Acid: A Nutritional Quandary. *Healthcare*, 5(2), 25. <https://doi.org/10.3390/healthcare5020025>

111. Jankauskienė, J., Brazaitytė, A., Bobinas, Č., & Duchovskis, P. (2013). Effect of Transplant Growth Stage on Tomato Activity. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 12(2), 143–152.
112. Jegadeesh, R., Lakshmanan, H., Kab, J., Sabar, V., & Raaman, N. (2018). Cultivation of pink Oyster mushroom *Pleurotus djamor* var. *roseus* on various agro-residues by low cost technique. *Journal of Mycopathological Research*, 56(3), 213–220.
113. Jin, Z., Li, Y., Ren, J., & Qin, N. (2018). Yield, Nutritional Content, and Antioxidant Activity of *Pleurotus ostreatus* on Corncoobs Supplemented with Herb Residues. *Mycobiology*, 46(1), 24–32.
<https://doi.org/10.1080/12298093.2018.1454014>
114. Juárez, C. (2021, October 6). *Cifras de la industria: consumo y producción de cerveza en México*. The Logistics World.
115. Karlović, A., Jurić, A., Ćorić, N., Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2020). By-Products in the Malting and Brewing Industries—Re-Usage Possibilities. *Fermentation*, 6(3), 82. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030082>
116. Karpova, G., Fomina, T., Vetoshkina, T., Borovskaia, T., Voronova, O., Dubskaia, T., Udut, V., & Khlusova, M. (2001). Preclinical toxicological study of D-glucuronic acid. *Экспериментальная и Клиническая Фармакология*, 64(1), 68–70.
117. Khan, M., Asi, M., Ahmad, N., Aslam, M., Rehman, A., & Javed, N. (2013). Effect of different levels of lime and pH on mycelial growth and production efficiency of oyster mushroom (*Pleurotus* spp.). *Pakistan Journal of Botany*, 45(1), 297–302.
118. Kim, E., Lee, D.-H., Won, S., & Ahn, H. (2015). Evaluation of Optimum Moisture Content for Composting of Beef Manure and Bedding Material Mixtures Using Oxygen Uptake Measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(5), 753–758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
119. Kirin Brewery Company. (2022, December 23). *Global Beer Consumption by Country in 2021*. Kirin Holdings.

120. Kılıç, C. (2020). Production of *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus djamor* in different contents and some physical analysis. *Wood Industry and Engineering*, 2(1), 17–23.
121. Koç, N., & Acar, R. (2015, October 3). The soil factors which effect on root growth in forage plants. *2nd International Conference on Sustainable Agriculture and Environment*.
122. Koide, S. S. (1998). Chitin-chitosan: Properties, benefits and risks. *Nutrition Research*, 18(6), 1091–1101. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(98\)00091-8](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(98)00091-8)
123. Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. *Agriculture*, 12(4), 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
124. Kumar, S., Singh, R. K., & Bharti, P. (2020). Decolorization Potential and Comparative Laccase Activity of *Pleurotus* Species. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(8), 1935–1942. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.908.221>
125. Kwiatkowski, C. A., & Harasim, E. (2021). The Effect of Fertilization with Spent Mushroom Substrate and Traditional Methods of Fertilization of Common Thyme (*Thymus vulgaris* L.) on Yield Quality and Antioxidant Properties of Herbal Material. *Agronomy*, 11(2), 329. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020329>
126. Lee, K. K., Kristanti, R. A., Yulisa, A., Rubiyatno, Ningsih, F., Syafrudin, M., Hernandes, E., & Albescu, M. (2022). Biosorption of Synthetic Dye by Macrofungi. *Industrial and Domestic Waste Management*, 2(2), 61–70. <https://doi.org/10.53623/idwm.v2i2.108>
127. LICHTENTHALER, H. K., & WELLBURN, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
128. Lim, S.-H., Lee, Y.-H., & Kang, H.-W. (2013). Efficient Recovery of Lignocellulolytic Enzymes of Spent Mushroom Compost from Oyster Mushrooms,

- Pleurotus* spp., and Potential Use in Dye Decolorization. *Mycobiology*, 41(4), 214–220. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2013.41.4.214>
129. Lima, V. H., Matugawa, A. T., Mascarín, G. M., & Fernandes, É. K. K. (2024a). Complex nitrogen sources from agro-industrial byproducts: impact on production, multi-stress tolerance, virulence, and quality of *Beauveria bassiana* blastospores. *Microbiology Spectrum*, 12(6). <https://doi.org/10.1128/spectrum.04040-23>
 130. Lima, V. H., Matugawa, A. T., Mascarín, G. M., & Fernandes, É. K. K. (2024b). Complex nitrogen sources from agro-industrial byproducts: impact on production, multi-stress tolerance, virulence, and quality of *Beauveria bassiana* blastospores. *Microbiology Spectrum*, 12(6). <https://doi.org/10.1128/spectrum.04040-23>
 131. Logsdon, S. D. (2015). Root Effects on Soil Properties and Processes: Synthesis and Future Research Needs. In D. Timlin & L. Ahuja (Eds.), *Enhancing Understanding and Quantification of Soil–Root Growth Interactions* (Vol. 4, pp. 173–196). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel4.c8>
 132. López, E., & Paz, L. (2023). *Conversión de Residuos Agrícolas a Azúcares Fermentables Útiles Para la Producción de Bioetanol* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí
 133. Ludwig, F., Jewitt, R. A., & Donovan, L. A. (2006). Nutrient and water addition effects on day- and night-time conductance and transpiration in a C3 desert annual. *Oecologia*, 148(2), 219–225. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0367-6>
 134. Lynch, K. M., Steffen, E. J., & Arendt, E. K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(4), 553–568. <https://doi.org/10.1002/jib.363>
 135. Ma, L., Lin, Q., Song, Y., Zhao, B., & Fan, M. (2020). Toxic effect of three imidazole ionic liquids on two terrestrial plants. *Open Life Sciences*, 15(1), 466–475. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0051>
 136. Macías-Rodríguez, L., Guzmán-Gómez, A., García-Juárez, P., & Contreras-Cornejo, H. A. (2018). *Trichoderma atroviride* promotes tomato development and alters the root exudation of carbohydrates, which stimulates fungal growth and the

- biocontrol of the phytopathogen *Phytophthora cinnamomi* in a tripartite interaction system. *FEMS Microbiology Ecology*. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy137>
137. Martínez, C. (2023, August 4). *Cerveza mexicana: conoce el valor de su producción, exportación y tendencias*. The Logistics World.
 138. Martínez-Berra, C., Díaz, R., Sánchez-Minutti, L., & Díaz-Godínez, G. (2018). Biodegradación de colorantes azo por *Pleurotus ostreatus*. *Mexican Journal of Biotechnology*, 3(1), 43–59. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2018.3.1.43>
 139. Martínez-Leal, J., Ponce-García, N., & Escalante-Aburto, A. (2020). Recent Evidence of the Beneficial Effects Associated with Glucuronic Acid Contained in Kombucha Beverages. *Current Nutrition Reports*, 9(3), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s13668-020-00312-6>
 140. Mayo Clinic. (2022, November 4). *Fibra alimentaria: esencial para una alimentación saludable*. Mayo Clinic.
 141. Medline plus. (2024, March 6). *Blood Glucose*. Medline Plus.
 142. Mia, F., Hussain, A., Mia, S., & Hassan, Z. (2020). Effect of variety and spacing on the resource use efficiency of maize. *Journal of Experimental Biosciences*, 11(2), 35–48.
 143. Miao, R., Yuan, W., Wang, Y., Garcia-Maquilon, I., Dang, X., Li, Y., Zhang, J., Zhu, Y., Rodriguez, P. L., & Xu, W. (2021). Low ABA concentration promotes root growth and hydrotropism through relief of ABA INSENSITIVE 1-mediated inhibition of plasma membrane H⁺-ATPase 2. *Science Advances*, 7(12). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4113>
 144. Michael, K. G. F. T., & Somani, B. K. (2022). Variation in Tap Water Mineral Content in the United Kingdom: Is It Relevant for Kidney Stone Disease? *Journal of Clinical Medicine*, 11(17), 5118. <https://doi.org/10.3390/jcm11175118>
 145. Miftahurrohmat, A., & Sutarman. (2018). The morphological response of the soybean growth (*Glycine max* (L)) until vegetative stage 3 on various intensities of light. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420, 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012069>

146. Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428.
<https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
147. Mora, M. (2022, September 21). *Cerveza artesanal es para degustarse, como los buenos vinos*. El Sol de San Luis.
148. Morón, C., Zacarías, I., & de Pablo, S. (1997). Análisis de fibra dietética. In C. Morón, I. Zacarías, & S. de Pablo (Eds.), *Producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición*. Universidad de Chile, Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos.
149. Mundim, G. de S. M., Maciel, G. M., & Mendes, G. de O. (2022). *Aspergillus niger* as a Biological Input for Improving Vegetable Seedling Production. *Microorganisms*, 10(4), 674. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040674>
150. Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
151. Naciri, R., Rajib, W., Chtouki, M., Zeroual, Y., & Oukarroum, A. (2022). Potassium and phosphorus content ratio in hydroponic culture affects tomato plant growth and nutrient uptake. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(4), 763–774. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01178-4>
152. National Center for Biotechnology Information. (2024a). *Congo red*. PubChem.
153. National Center for Biotechnology Information. (2024b, July 16). *Bromophenol Blue*. Pubchem .
154. National Health Service. (2023, May 19). *Sugar: the facts*. National Health Service.
155. National Institutes of Health. (2019, March 5). *Potasio*. National Institutes of Health.
156. National Institutes of Health. (2020, March 24). *Magnesio*. National Institutes of Health.
157. Navarro, M. (2020, January 2). *Crecen tiraderos de basura clandestinos en la CDMX*. El Sol de México.

158. NAYAK, H., KUSHWAHA, A., SRIVASTAVA, S., KUSHWAHA, K. P. S., CHANDRA BEHERA, P., BALA, P., SHAHI, N. C., & KUMAR, A. (2022). Economically viable Mushroom (*Pleurotus djamor*) farming for nutritional security in Uttarakhand. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(5), 577–581. <https://doi.org/10.56093/ijas.v92i5.124628>
159. Neves, M. F., Trombin, V. G., Lopes, F. F., Kalaki, R., & Milan, P. (2011). World consumption of beverages. In *The orange juice business* (pp. 118–118). Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-739-4_31
160. Nieto Juárez, J. I., Cuzcano Ruiz, Á. D., & Reyes López, W. A. (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>
161. Nwoko, M., Ehumadu, C., Achufusi, J., Nmezi, S., Ezekoye, M., Ahaiwe, M., Okwulehie, I., Ogwo, N., & Chukwuma, O. (2022). Variability effect of pH on yield optimization and Mycochemical compositions of *Pleurotus ostreatus* sporophores cultured on HCl-induced substrate . *African Journal of Plant Science*, 16(5), 97–110.
162. Owaid, M. N., Abed, I. A., & Al-Saeedi, S. S. S. (2017). Applicable properties of the bio-fertilizer spent mushroom substrate in organic systems as a byproduct from the cultivation of *Pleurotus* spp. *Information Processing in Agriculture*, 4(1), 78–82. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.01.001>
163. Padmore, J. (1990). Animal feed. In *Official Methods of Analysis* (1st ed.). Association of Official Analytical Chemists.
164. Panawala, L. (2017, April 11). *Difference between Chlorophyll A and B*. Pediaa.
165. Papinutti, L., & Forchiassin, F. (2010). Adsorption and decolorization of dyes using solid residues from *Pleurotus ostreatus* mushroom production. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 15(6), 1102–1109. <https://doi.org/10.1007/s12257-010-0074-3>
166. Pasin, T. M., dos Anjos Moreira, E., de Lucas, R. C., Benassi, V. M., Ziotti, L. S., Cereia, M., & Polizeli, M. de L. T. de M. (2020). Novel amylase-producing

- fungus hydrolyzing wheat and brewing residues, *Aspergillus carbonarius*, discovered in tropical forest remnant. *Folia Microbiologica*, 65(1), 173–184.
<https://doi.org/10.1007/s12223-019-00720-4>
167. Pathak, P., Singh, C., Chaudhary, N., Rathi, A., & Vyas, D. (2021). Fertilizing with Spent Mushroom Compost. In *Recent Trends in Mushroom Biology* (1st ed., pp. 174–186). Vishwagyan Prakashan.
 168. Pereira de Moura, F., & Rocha dos Santos Mathias, T. (2018). A Comparative Study of Dry and Wet Milling of Barley Malt and Its Influence on Granulometry and Wort Composition. *Beverages*, 4(3), 51.
<https://doi.org/10.3390/beverages4030051>
 169. Persistance Market Research. (2023, March 20). *Alpha Amylase Market*. Persistance Market Research.
 170. Peško, M., Molnářová, M., & Fargašová, A. (2016). Response of Tomato Plants (*Solanum lycopersicum*) to Stress Induced by Sb(III). *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*, 24(1), 42–47. <https://doi.org/10.1515/aeuc-2016-0006>
 171. Pilatin, S., & Kunduhoglu, B. (2016). The Decolorization of Reactive Textile Dyes by *Pleurotus Sajor-Caju* . *Journal of Applied Biological Sciences*, 9(2), 41–45.
 172. Plamer, J. (2006). Brewing Your First Extract and Specialty Grain Beer. In *How to Brew* (3rd ed., pp. 112–127). Brewers Publications.
 173. Pomeranz, Y., & Meloan, C. E. (1994). Ash and Minerals. In *Food Analysis* (pp. 602–624). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6998-5_35
 174. Precision Fermentation. (2022). *Water Chemistry for Brewers Key Considerations for Quality and Consistency*.
 175. Punčochářová, L., Pořízka, J., Diviš, P., & Štursa, V. (2019). Study of the influence of brewing water on selected analytes in beer. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 13(1), 507–514. <https://doi.org/10.5219/1046>
 176. Purwanto, E., & Prasetyo, T. (2021). Changing the Paradigm of a Linear Economy into a Circular Economy in Residential Waste Management. *IOP*

- Conference Series: Earth and Environmental Science*, 945(1), 012054.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/945/1/012054>
177. Queensland Government. (2023, June 12). *Soil fertility decline*. Queensland Government.
 178. Radhika, R., Jebapriya, G. R., & Gnanadoss, J. J. (2014). Decolourization of Synthetic Textile Dyes using the Edible Mushroom Fungi *Pleurotus*. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 17(2), 248–253.
<https://doi.org/10.3923/pjbs.2014.248.253>
 179. Rafiei, B., Ghadamyari, M., Imani, S., Hosseininaveh, V., & Ahadiyat, A. (2016). Purification and characterization of α -amylase in Moroccan locust, *Dociostaurus maroccanus* Thunberg (Orthoptera: Acrididae) and its inhibition by inhibitors from *Phaseolus vulgaris* L. *Toxin Reviews*, 35(3–4), 90–97.
<https://doi.org/10.1080/15569543.2016.1207190>
 180. Rafique, M. A., Kiran, S., Javed, S., Ahmad, I., Yousaf, S., Iqbal, N., Afzal, G., & Rani, F. (2021). Green synthesis of nickel oxide nanoparticles using *Allium cepa* peels for degradation of Congo red direct dye: an environmental remedial approach. *Water Science and Technology*, 84(10–11), 2793–2804.
<https://doi.org/10.2166/wst.2021.237>
 181. Raman, J., Lakshmanan, H., Jang, K., Oh, M., Oh, Y., & Im, J. (2020). Nutritional composition and antioxidant activity of pink oyster mushrooms (*Pleurotus djamor* var. *roseus*) grown on a paddy straw substrate . *Journal of Mushrooms*, 18(3), 189–200. <https://doi.org/10.14480/JM.2020.18.3.189>
 182. Rawashdeh, R., Saadoun, I., & Mahasneh, A. (2005). Effect of cultural conditions on xylanase production by *Streptomyces* sp. (strain Ib 24D) and its potential to utilize tomato pomace. *African Journal of Biotechnology*, 4(3), 251–255.
 183. Reva Aulia Qorri, Periadnadi, & Nurmiati. (2022). Enzyme activities in the spent mushroom substrate from *Pleurotus ostreatus*. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 16(2), 942–947.
<https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.16.2.1253>

184. Rodríguez, G. E., Martínez, D. A., Buglione, M. B., Filippi, M. V., & Agüero, M. S. (2018). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* (Jacq .: Fr.) Kummer on pear pomace: Evaluation of productivity and chemical composition of the biodegraded substrate. *Anales de Biología*, 40, 21–30. <https://doi.org/10.6018/analesbio.40.03>
185. Rodríguez García, D., & Vargas Rojas, J. (2022). Efecto de la inoculación con *Trichoderma* sobre el crecimiento vegetativo del tomate (*Solanum lycopersicum*). *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52045>
186. Romero, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, 25(54).
187. Ruilova, M., Hernández, A., & Niño, Z. (2017). Influence of C/N ratio on productivity and the protein contents of *Pleurotus ostreatus* grown in different residue mixtures . *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(2), 331–344.
188. SafetyCulture. (2024, January 15). *Economía circular: Más que reciclaje*. SafetyCulture.
189. Saha, S., Tamang, S., Saha, D., & Saha, A. (2023). Agro-industrial waste based substrate for production of two major cultivated oyster mushrooms in sub-Himalayan West Bengal. *Journal of Environmental Biology*, 44(4), 648–654. <https://doi.org/10.22438/jeb/44/4/MRN-5089>
190. Sales, C., Ferreira, A., Teixeira, M., Minhoni, A., & Nogueira, M. (2009). Mineral composition of raw material, substrate and fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* in culture. *Interciencia*, 34(6), 432–436.
191. Salmones, D. (2017). *Pleurotus djamor*, un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico. *Revista Mexicana de Micología*, 46, 73–85.
192. Sánchez, A., Esqueda, M., Gaitán, R., Córdova, A., & Coronado, M. (2008). Uso potencial del rastrojo de tomate como sustrato para el cultivo de *Pleurotus* spp. *Revista Mexicana de Micología*, 28, 17–24.
193. Sánchez, F., Moreno, E., & Cruz, E. (2009). Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15(1), 67–73.

194. Sané, A. K., Diallo, B., Kane, A., Sagna, M., Sané, D., & Sy, M. O. (2021). In vitro Germination and Early Vegetative Growth of Five Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Varieties under Water Stress Conditions. *American Journal of Plant Sciences*, 12(10), 1478–1502. <https://doi.org/10.4236/ajps.2021.1210105>
195. Sanhueza C, J., Nieto K, S., & Valenzuela B., A. (2002). ACIDO LINOLEICO CONJUGADO: UN ACIDO GRASO CON ISOMERIA TRANS POTENCIALMENTE BENEFICIOSO. *Revista Chilena de Nutrición*, 29(2).
<https://doi.org/10.4067/S0717-75182002000200004>
196. Sariatli, F. (2017). Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31–34.
<https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>
197. Secretaria de economía. (2012). *Norma Mexicana NMX -AA-013-SCFI-2006 Residuos Sólidos – Determinación de pH – Método de prueba*.
198. Segura, F. (2022, April 28). *Cada año aparecen hasta tres vertederos de basura ilegales en la zona metropolitana de Querétaro*. Via Tr3s.
199. Serrano, L., Ramos, M., Bautista, S., Salazar, D., & Martínez, O. (2023). *Evaluación de productos comerciales y cubiertas de quitosano/aceites esenciales, en el desarrollo de hongos postcosecha in vitro y en jitomate Saladette* [tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
200. Shah, T., Gul, T., & Saeed, K. (2019). Photodegradation of bromophenol blue in aqueous medium using graphene nanoplates-supported TiO₂. *Applied Water Science*, 9(4), 105. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0983-z>
201. Shakerdi, L. A., Wallace, L., Smyth, G., Madden, N., Clark, A., Hendroff, U., McGovern, M., Connellan, S., Gillman, B., & Treacy, E. P. (2022). Determination of the lactose and galactose content of common foods: Relevance to galactosemia. *Food Science & Nutrition*, 10(11), 3789–3800. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2976>
202. Shalahuddin, A., Ahmed, K., Miah, N., Rashid, M., & Haque, M. (2019). Effect of Chemical Nutrients (NPK) on Proximate Nutrient and Mineral Content of Oyster

- Mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *International Journal of Nutritional Science and Food Technology*, 5(4), 25–30.
203. Shan, K. C., & Hassan, S. R. (2022). *Extraction of crude enzymes from spent P. ostreatus substrate and its potential use in dye removal*. 030023.
<https://doi.org/10.1063/5.0078665>
 204. Sharma, J., Sharma, D., Sharma, A., & Bansal, S. (2021). Thermo stable tyrosinase purified from *Pleurotus djamor* grown in biomimetic calcium carbonate: A biological strategy to industrial waste remediation. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101294>
 205. Sharma, K., Pandit, S., Thapa, B. sen, & Pant, M. (2022). Biodegradation of Congo Red Using Co-Culture Anode Inoculum in a Microbial Fuel Cell. *Catalysts*, 12(10), 1219. <https://doi.org/10.3390/catal12101219>
 206. Shiralipour, A., McConnell, D. B., & Smith, W. H. (1992). Uses and benefits of MSW compost: A review and an assessment. *Biomass and Bioenergy*, 3(3–4), 267–279. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(92\)90031-K](https://doi.org/10.1016/0961-9534(92)90031-K)
 207. Shraddha, Shekher, R., Sehgal, S., Kamthania, M., & Kumar, A. (2011). Laccase: Microbial Sources, Production, Purification, and Potential Biotechnological Applications. *Enzyme Research*, 2011, 1–11.
<https://doi.org/10.4061/2011/217861>
 208. Sierra Nevada Brewing Co. (2021, June 25). *Ale vs lager*. Sierra Nevada Brewing Co.
 209. Singh, M., Pandey, A., Vishwakarma, S., Srivastava, A., & Pandey, V. (2012). Extracellular xylanase production by *Pleurotus* species on lignocellulosic wastes under in vivo condition using novel pretreatment. *Cellular and Molecular Biology*, 58(1), 170–173.
 210. Singh, R. K., Solankey, S. S., Dwivedi, N., Upadhyay, D. K., Singh, P. K., & Singh, V. K. (2024). Interpretation for genetic nature of morphological traits and phyto-physio-chemical properties in tomato: An overview. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 13(2), 114–127.
<https://doi.org/10.22271/phyto.2024.v13.i2b.14876>

211. Singh, S., & Singh, G. (2018). Effect of different pH, Temperature and Media on Radial Growth of Oyster Mushrooms (*Pleurotus djamor*) . *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 7(11), 73–77.
212. Solis, M., Bárzana, E., García, M., & Viniegra, G. (2007). The ABTS an oxidant agent of different chemical compounds and its recycling process between laccase and sustrate. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* , 6(3), 275–281.
213. Sorgonà, A., Abenavoli, M. R., Cacco, G., & Gelsomino, A. (2011). Growth of Tomato and Zucchini Seedlings in Orange Waste Compost Media: pH and Implication of Dosage. *Compost Science & Utilization*, 19(3), 189–196.
<https://doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736999>
214. Srečec, S., Rezić, T., Šantek, B., & Marić, V. (2009). Hop pellets type 90: Influence of manufacture and storage on losses of α -acids. *Acta Alimentaria*, 38(1), 141–147. <https://doi.org/10.1556/AAlim.2008.0014>
215. Stamets, P. (1993). The Oyster Mushrooms. In *Growing gourmet and Medicinal Mushrooms* (1st ed., pp. 297–313). Ten Speed Press.
216. Sulistiany, H., Sudirman, L. I., & Dharmaputra, O. S. (2016). Production of Fruiting Body and Antioxidant Activity of Wild *Pleurotus*. *HAYATI Journal of Biosciences*, 23(4), 191–195. <https://doi.org/10.1016/j.hjb.2016.07.003>
217. Sutherland, B., Steele, K., Carter, J., & Cook, D. D. (2023). The influence of water content on the longitudinal modulus of elasticity of maize stalk pith and rind tissues. *Plant Methods*, 19(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01039-5>
218. Swett, R. (2017, March 24). *Tomato Transplanting Tips*. The Real Dirt Blog.
219. Torres-Martínez, B. del M., Vargas-Sánchez, R. D., Torrescano-Urrutia, G. R., Esqueda, M. C., Rodríguez-Carpena, J. G., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. Á., & Sánchez-Escalante, A. (2023). Propiedades fisicoquímicas, tecnofuncionales y antioxidantes de harinas de *Pleurotus* spp. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 26.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.595>
220. Unión Europea. (2023). Summary of the application: L-Fucose . *European Comission*.

221. United Nations. (2023). *Sustainable Development Goals*. United Nations.
222. University of California San Francisco. (2024). *Increasing Fiber Intake*. UCSF Health.
223. Urbanisme. (n.d.). *RELACIÓN CARBONO NITROGENO (C/N) EN LOS ABONOS ORGÁNICOS*. La Paeria Ajuntament de Lleida.
224. Valdés-Rodríguez, O. A., Sánchez-Sánchez, O., & Pérez-Vázquez, A. (2013). Effects of soil texture on germination and survival of non-toxic *Jatropha curcas* seeds. *Biomass and Bioenergy*, 48, 167–170.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.025>
225. Valenzuela-Cobos, J. D., Rodríguez-Grimón, R. O., Zied, D. C., Endara, A. G., Garcés-Moncayo, M. F., Garín-Aguilar, M. E., Sánchez-Hernández, A., & Valencia del Toro, G. (2019a). Chemical composition and biological properties of *Pleurotus* spp. cultivated on peat moss and wheat straw. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 830. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i11.2034>
226. Valenzuela-Cobos, J. D., Rodríguez-Grimón, R. O., Zied, D. C., Endara, A. G., Garcés-Moncayo, M. F., Garín-Aguilar, M. E., Sánchez-Hernández, A., & Valencia del Toro, G. (2019b). Chemical composition and biological properties of *Pleurotus* spp. cultivated on peat moss and wheat straw. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 830. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i11.2034>
227. Valiente, L., Ohaco, E., & de Michelis, A. (2016). Antioxidant capacity of frozen *Pleurotus ostreatus* during convective drying. *Micología Aplicada Internacional*, 28(1), 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000200003>
228. van Donkelaar, L. H. G., Mostert, J., Zisopoulos, F. K., Boom, R. M., & van der Goot, A.-J. (2016). The use of enzymes for beer brewing: Thermodynamic comparison on resource use. *Energy*, 115, 519–527.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.011>
229. Vandamme, E. J. (2009). Agro-Industrial Residue Utilization for Industrial Biotechnology Products. In *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation* (pp. 3–11). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_1

230. Varnero, M., Quiroz, M., & Álvarez, C. (2010). Utilización de Residuos Forestales Lignocelulósicos para Producción del Hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*). *Información Tecnológica*, 21(2), 13–20.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000200003>
231. Vats, A., Kurade, A. S., & Mutnuri, S. (2022). Recovery of Lignocellulolytic Enzymes and Valorization of Spent Mushroom Substrate. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(1), 1–9.
<https://doi.org/10.32526/ennrj/20/202100099>
232. Velázquez, B., Hernández, E., Tovar, X., Castillo, L., Díaz, G., Tellez, A., & Álvarez, J. (2021). Biological efficiency and nutritional composition of *Pleurotus djamor* cultivated on bagasse of *Agave salmiana*. *Research Square*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-629407/v1>
233. Velusami, B., Jordan, S. N., Curran, T., & Grogan, H. (2021). Fertiliser characteristics of stored spent mushroom substrate as a sustainable source of nutrients and organic matter for tillage, grassland and agricultural soils. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 60(1). <https://doi.org/10.15212/ijafr-2020-0121>
234. Viel, M., Collet, F., & Lanos, C. (2018). Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material. *Industrial Crops and Products*, 120, 214–237.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>
235. Voijant Tangahu, B. (2016). Growth Rate Measurement of *Scirpus Grossus* Plant as Preliminary Step to Apply the Plant in Wastewater Treatment Using Reedbed System. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 05(06).
<https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000192>
236. Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M. H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C. C., & Marc, R. A. (2022). Plants' Physio-Biochemical and Phyto-Hormonal Responses to Alleviate the Adverse Effects of Drought Stress: A Comprehensive Review. *Plants*, 11(13), 1620.
<https://doi.org/10.3390/plants11131620>

237. White, C., & Zainasheff, J. (2010). Esters, Alcohols and more. In W. Pengelly (Ed.), *Yeast the practical guide to beer fermentation* (pp. 35–63). Brewers Publications.
238. Willis, J., Adhikari, A., Dunaway, C., Parish, J., Kuehny, J., Moreira, J., & Timmerman, A. (2022, May 25). *Composting Series: Compost Moisture Content*. LSU AgCenter.
239. Wisbaum, S. (2021, September). *Moisture Management: The Key to Successful Composting*. CV Compost.
240. Xiong, M., Huang, Y., Liu, Y., Huang, M., Song, G., Ming, Q., Ma, X., Yang, J., Deng, S., Wen, Y., Shen, J., Liu, Q., Zhao, P., & Yang, X. (2018). Antidiabetic Activity of Ergosterol from *Pleurotus Ostreatus* in KK-A^y Mice with Spontaneous Type 2 Diabetes Mellitus. *Molecular Nutrition & Food Research*, 62(3).
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201700444>
241. Yadav, P., Maharjan, J., Korpole, S., Prasad, G. S., Sahni, G., Bhattarai, T., & Sreerama, L. (2018). Production, Purification, and Characterization of Thermostable Alkaline Xylanase From *Anoxybacillus kamchatkensis* NASTPD13. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00065>
242. Yehia, R. S., & Rodriguez-Couto, S. (2017). Discoloration of the azo dye Congo Red by manganese-dependent peroxidase from *Pleurotus sajor caju*. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 53(2), 222–229.
<https://doi.org/10.1134/S0003683817020181>
243. Yunan, N. A. M., Shin, T. Y., & Sabaratnam, V. (2021). Upcycling the Spent Mushroom Substrate of the Grey Oyster Mushroom *Pleurotus pulmonarius* as a Source of Lignocellulolytic Enzymes for Palm Oil Mill Effluent Hydrolysis. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(6), 823–832.
<https://doi.org/10.4014/jmb.2103.03020>
244. Yurina, N. A., Koshchaev, A. G., Osepchuk, D. V., Maksim, E. A., Danilova, A. A., & Shumeiko, D. V. (2019). Artificial Ecological System Hydroponics: The Wheat

- Grains Germination Rate. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 4957–4960. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A2109.109119>
245. Zacarías, M. (2022, September 17). *Nueve Cervezas artesanales potosinas que no te puedes perder*. Quadratin San Luis Potosí.
246. Zadražil, F. (1975). Influence of CO₂ concentration on the mycelium growth of three pleurotus species. *European Journal of Applied Microbiology*, 1(4), 327–335. <https://doi.org/10.1007/BF01382692>
247. Zhou, J.-L., Song, S., Huang, Z.-X., Yang, L., Jiao, A.-G., Liu, Y., & Wang, S.-X. (2018). Cultivation of *Pleurotus ostreatus*, a potential candidate for biogas residues degradation. *BioResources*, 13(3), 5432–5449. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.5432-5449>
248. Zhou, S., Ma, F., Zhang, X., & Zhang, J. (2016). Carbohydrate changes during growth and fruiting in *Pleurotus ostreatus*. *Fungal Biology*, 120(6–7), 852–861. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2016.03.007>
249. Zhuo, R., Zhang, J., Yu, H., Ma, F., & Zhang, X. (2019). The roles of *Pleurotus ostreatus* HAUCC 162 laccase isoenzymes in decolorization of synthetic dyes and the transformation pathways. *Chemosphere*, 234, 733–745. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.113>

XI. Reporte de similitud

Aprovechamiento de residuos de la industria cervecera POR LUIS ALEJANDRO CASTILLO GONZÁLEZ	Citas incluidas Bibliografía incluida	19% SIMILAR
--	--	-------------------------------

XII. Anexos

12.1 Preparación Reactivo DNS

Para 100 mililitros.

1 gramo de Hidróxido de sodio.

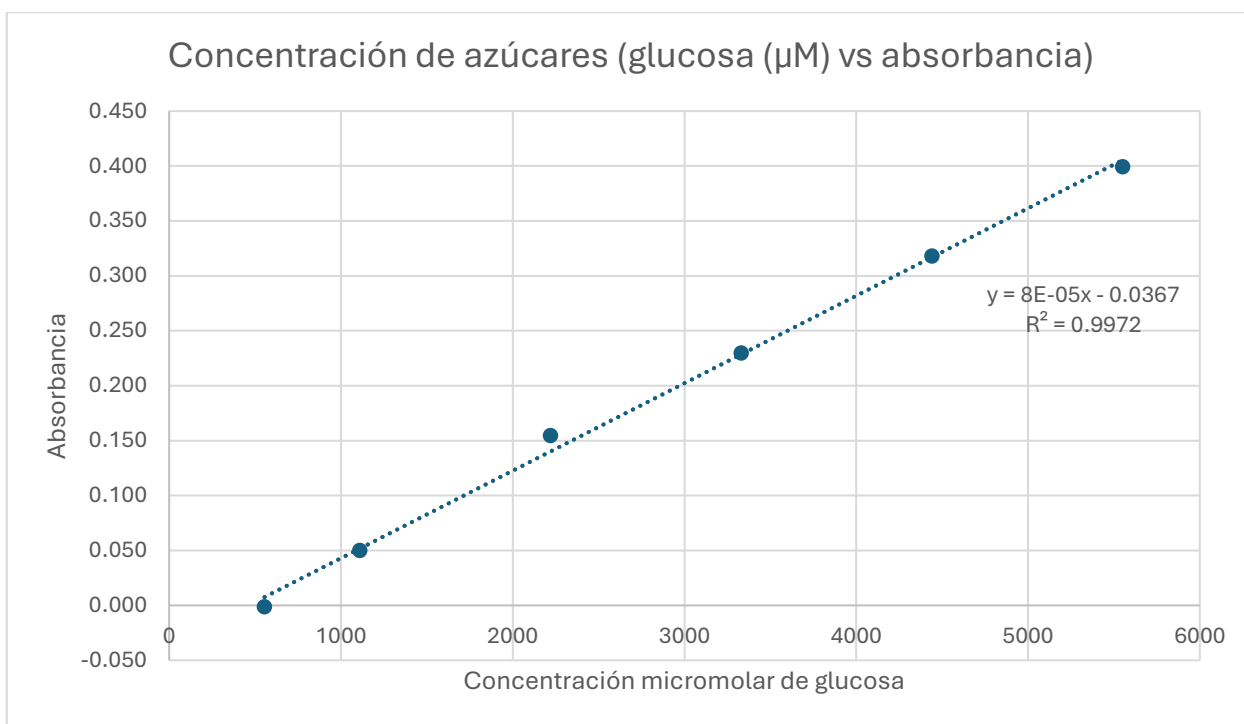
20 gramos de tartrato de sodio y potasio.

0.2 gramos de fenol.

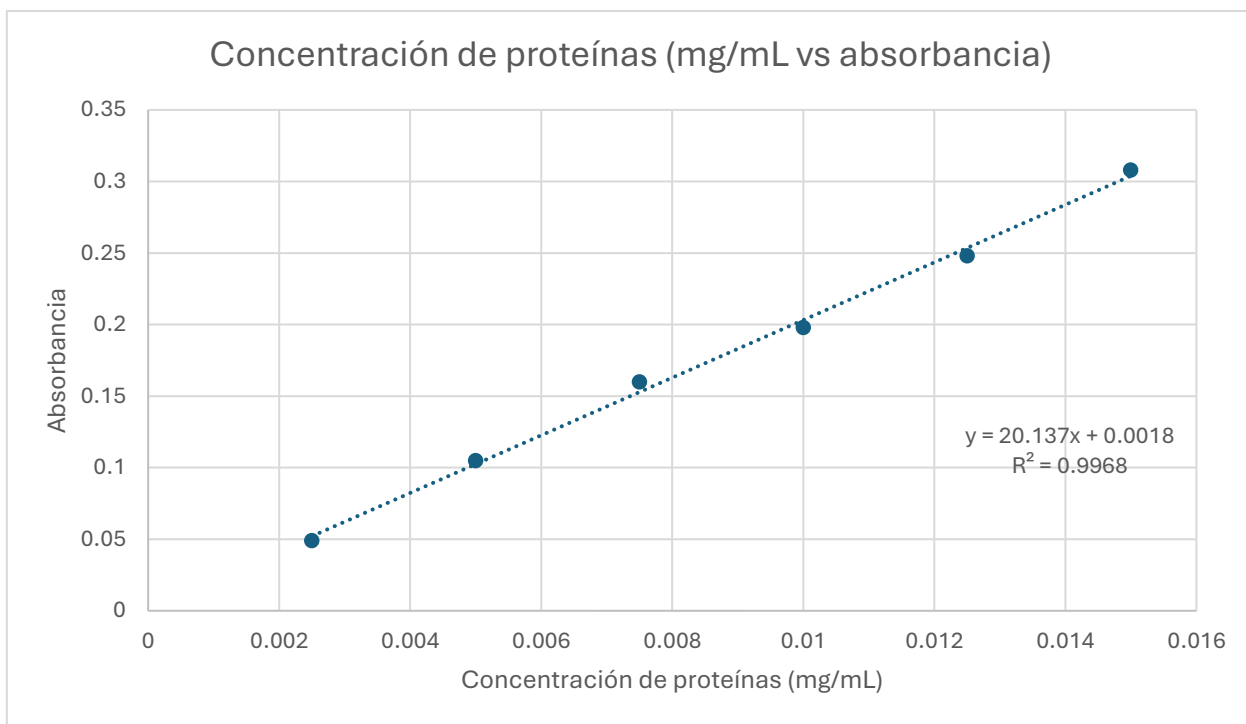
1 gramo de ácido 3,5-dinitro-salicílico.

12.2 Curvas de calibración

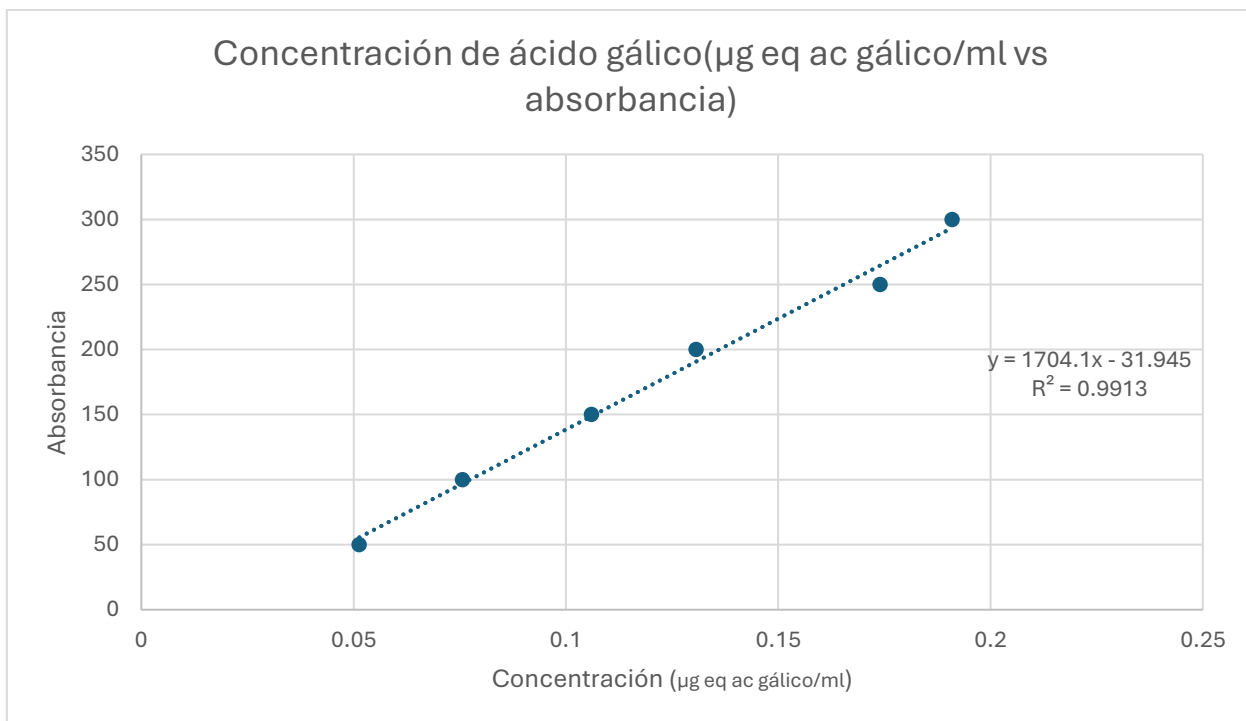
12.2.1 Curva de calibración DNS



12.2.2 Curva calibración proteínas por método de Bradford



12.2.3 Curva de calibración de ácido gálico



12.3 Retribución social durante el desarrollo del trabajo

Ponente de conferencia, Cerveza México 2022, Ciudad de México, World Trade Center



Ponente de conferencia, Agroconciencia 2022, Colombia, Universidad Nacional de Colombia



El comité organizador certifica la presentación de la **ponencia oral**:

De los autores y co-autores:

Durante el **1er Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Agro - AGROCONCIENCIA 2022**,
desarrollado de manera virtual entre el 5 y el 7 de diciembre de 2022.

Rodrigo Alfredo Martínez Sarmiento
Director de Investigación y Desarrollo
Investigador Ph.D. Senior
AGROSAVIA

Luis Ernesto Rodríguez Molano
Decano
Facultad de Ciencias Agrarias - sede Bogotá
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Ponente en modalidad oral, Jornadas Internacionales de Juventudes Científicas 2022, Tonalá, Universidad de Guadalajara



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE TONALÁ
Secretaría Académica/
Coordinación de Investigación

Otorga la presente

Constancia

Castillo González Luis Alejandro

Por su participación como ponente durante las Jornadas Internacionales de Juventudes Científicas 2022, con el proyecto titulado "Potencial biotecnológico de residuos cerveceros para el cultivo y obtención de enzimas extracelulares de pleurotus ostreatus y pleurotus djamor" en modalidad Presencial, evento llevado a cabo los días 7,8 y 9 de diciembre del presente año en las instalaciones de nuestro Centro Universitario.

Atentamente
"Piensa y Trabaja"

"2022. Guadalajara, Hogar de la Feria Internacional del Libro y Capital Mundial del Libro"
Tonalá, Jalisco, 10 de diciembre del 2022



Dra. Liliana Ibeth Castañeda Rentería
Coordinadora de Investigación



Mtro. Luis Armando Cortés Enriquez
Incorporación Temprana a la Investigación



El congreso virtual de Expo Cerveza Guadalajara otorga la presente

CONSTANCIA

DE PARTICIPACIÓN

A: *Luis Alejandro Castillo González*

Por su participación en la Conferencia Virtual de
Reutilización de residuos para formar productos de valor
agregado el 3 de Mayo del 2023.



ANA ROSA CORRAL
Gerente de exposición



Ponente en modalidad cartel, 18 Reunión Internacional de Investigación en Productos Naturales, Morelia, Amipronat



Ponente de conferencia, Semana de la Ciencia XXV 2023, San Luis Potosí, Instituto Cervantes Apostólica



El Instituto Cervantes, Apostólica
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Ing. Luis Alejandro Castillo González

Por su participación en

Semana de la Ciencia XXV

San Luis Potosí, S.L.P. junio 2023



M.C.A. José Eduardo Lomelí Robles
Director General



Ponente de trabajo oral, XX Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Ixtapa, Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería



**CONGRESO NACIONAL
DE BIOTECNOLOGÍA Y BIOINGENIERÍA**
11 - 15 DE
SEPTIEMBRE 2023



40
Aniversario

LA SOCIEDAD MEXICANA DE BIOTECNOLOGÍA Y BIOINGENIERÍA

OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A:

**Luis Alejandro Castillo González, Rubén Darío Cárdenas Duarte, José Luis
Martínez Salgado, Luz María Teresita Paz Maldonado**

Por su participación en la sesión de trabajos libres orales con el resumen:

**POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE RESIDUOS CERVECEROS PARA EL CULTIVO Y
OBTENCIÓN DE ENZIMAS EXTRACELULARES DE PLEUROTUS DJAMOR**

del 11 al 15 de septiembre de 2023
Ixtapa Zihuatanejo, Gro.

SRA. ROMINA ROBRIGUEZ SANOJA
PRESIDENTA MDN 2022-2024

DR. LUIS FLORES COTERA
PRESIDENTE DEL CONGRESO

DRA. BEATRIZ RUIZ VILLAFÁN
SECRETARIA MDN 2022-2024

Ponente de conferencia, Cerveza México 2023, Ciudad de México, World Trade Center



reVOLUCIÓN + e VOLUCIÓN = EXPO CERVEZA



OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO A

IBP. Luis Alejandro Castillo González

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN COMO

PONENTE

DEL CONGRESO DE EXPO CERVEZA

LOS DÍAS 20 Y 21 DE OCTUBRE DEL 2023

WORLD TRADE CENTER, CIUDAD DE MÉXICO

Wendy Hasketh
Presidenta

Ana Rosa Corral
Directora de Exposiciones

TRADEx
Exposiciones

Ponente modalidad cartel, XIV congreso de la Rama de Biología Molecular y Celular de Hongos 2023, Guadalajara



Se otorga la presente

CONSTANCIA a:

Luis Alejandro Castillo González

Por su asistencia y presentación del trabajo titulado:

Circular economy in a brewery: The use of Brewer's Spent Grain for the growth of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus djamor*

Por:

Luis Alejandro Castillo González, Rubén Darío Cárdenas Duarte,
José Luis Martínez Salgado, Luz María Teresita Paz Maldonado

En la modalidad de cartel en el XIV Congreso de la Rama de Biología Molecular y Celular de Hongos, 15 – 19 de octubre de 2023, Guadalajara, Jal.

Atentamente

Por el Comité Organizador

Dra. Alicia González Manjarrez

Impartidor de curso teórico para Olimpiada Nacional de Biología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí 2023, San Luis Potosí



ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS
OLIMPIADA DE BIOLOGÍA



I.B.P. Luis Alejandro Castillo González

Presente

Estimado I.B.P. Castillo González

Sirva la presente para expresarle nuestro más sincero agradecimiento por su valiosa participación en la preparación académica de los estudiantes que formaron parte de la delegación que representó al estado de San Luis Potosí en la **XXXIII Olimpiada Nacional de Biología** realizada de forma presencial en la UAS del 12 al 16 de noviembre de 2023.

El curso teórico-práctico que usted impartió sobre “**Crecimiento y nutrición fúngica**” con un total de 5 horas contribuyó en forma importante para incrementar el acervo de conocimientos de los estudiantes seleccionados.

Sin otro particular por el momento y agradeciendo una vez más su desinteresado apoyo, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente,

Dra. Ma. Cristina Revilla Monsalve
Coordinadora
Olimpiada Nacional de Biología

Asesor de proyecto terminal "*Evaluación del crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* en bagazo de malta de diferentes estilos cerveceros*" 2023, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí



A quien corresponda:

La presente hace constar que, el I.B.P. **LUIS ALEJANDRO CASTILLO GONZÁLEZ**, participó como asesor en el desarrollo del Proyecto Terminal correspondiente al noveno semestre del programa educativo de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Ciencias Químicas UASLP, realizado por el estudiante **José Guillermo Flores Martínez** con clave de alumno 263456, en el periodo agosto - diciembre del 2023 con el tema "Evaluación del crecimiento del hongo *Pleurotus ostreatus* en bagazo de malta de diferentes estilos cerveceros".

Se extiende la presente constancia para los fines que al interesado convengan, a los catorce días del mes de diciembre de dos mil veintitrés.

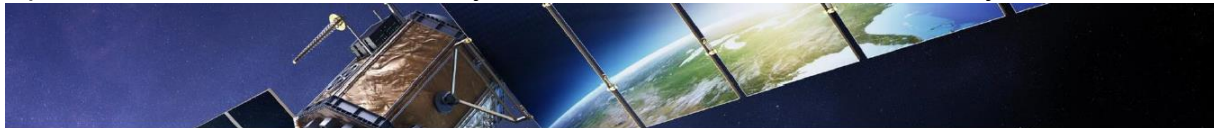
M.C. Liliána L. Lara García
Coordinadora del Programa Educativo de Ingeniería de Bioprocesos
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Teléfono 4448262300 ext. 6535
coordingbio@cq.uaslp.mx
lara.garcialiliana@uaslp.mx

2023



Av. Dr. Manuel Nava Núm. 6
Zona Universitaria • CP 78210
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 24 40 al 46
fax (444) 826 2372

Speaker of conference, Earth Day 2024, Americas and LATAM, Honeywell



CERTIFICATE OF APPRECIATION

This certificate is presented to

IBP. Luis Castillo

For his valuable participation as a speaker during Earth Day webinars organized by BA LATAM HSE team. Sharing their knowledge about sustainability and experience in circular economy projects, encouraging us.

on April 2024

Neove Pipper
Regional Manager

Sam McEwen
Director HSE

Shaira Rios
Sr HSE Engineer

Honeywell

Honeywell Internal

Ponente, Simposio en Ingeniería en Biotecnología 2024, Puebla, Universidad Iberoamericana



Departamento de Ciencias e Ingenierías

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a: Ing. Luis Alejandro Castillo González

Por su ponencia:

**Potencial Biotecnológico de Residuos
Cerveceros Para el Cultivo, Obtención de
Enzimas Extracelulares y biofertilizantes de
Pleurotus ostreatus y *Pleurotus djamor***

San Andrés Cholula, Puebla a 22 de abril del 2024

Mtro. Enrique Villa Álvarez

Director del Departamento de Ciencias e Ingenierías

LA VERDAD NOS HARÁ LIBRES



IBERO

CIUDAD DE MÉXICO • LEÓN • PUEBLA • Toluca • Toluca • Toluca



ITESO Universidad
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente



Asesor de proyecto terminal “Evaluación de la decoloración de azo colorantes usados en la industria textil con extractos enzimáticos recuperados del residuo remanente del cultivo de hongos del género *Pleurotus*” 2024, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí



A quien corresponda

La Coordinadora de la carrera de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

HACE CONSTAR

que la IBP. Luis Alejandro Castillo González, adscrita a la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, participó durante el semestre enero-mayo 2024, como asesor del Proyecto Terminal desarrollado por la alumna, Miriam Aranda Dávila, titulado “Evaluación de la decoloración de azo colorantes usados en la industria textil con extractos enzimáticos recuperados del residuo remanente del cultivo de hongos del género *Pleurotus*”, que comprendió del 15 de enero al 24 de mayo de 2024, periodo correspondiente al noveno semestre del Programa Educativo de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Se extiende la presente constancia, en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., para los fines que al interesado convengan, a los tres días del mes de julio de dos mil veinticuatro.

“SIEMPRE AUTÓNOMA. POR MI PATRIA EDUCARÉ”

Dra. Alejandra Wong Arce
Coordinadora del Programa Educativo de Ingeniería de Bioprocesos
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Teléfono 4448262300 ext. 6535
coordingbio@cq.uaslp.mx

www.uaslp.mx

Av. Dr. Manuel Nava Ramírez 6
Zona Universitaria • CP 76500
San Luis Potosí, S.L.P.
tel: (446) 926 24 40 al 46
fax: (446) 926 2372

Asesor de proyecto terminal "*Evaluación del crecimiento de solanum lycopersicum en composta de sustrato gastado post – cosecha de Pleurotus ostreatus*" 2024,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí



A quien corresponda

La Coordinadora de la carrera de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

HACE CONSTAR

que la IBP. Luis Alejandro Castillo González, adscrita a la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, participó durante el semestre enero-mayo 2024, como asesor del Proyecto Terminal desarrollado por la alumna, Karol Polet Juárez Cruz, titulado "*Evaluación del crecimiento de Solanum lycopersicum en composta de sustrato gastado post-cosecha de Pleurotus ostreatus*", que comprendió del 15 de enero al 24 de mayo de 2024, periodo correspondiente al noveno semestre del Programa Educativo de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Se extiende la presente constancia, en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., para los fines que al interesado convengan, a los tres días del mes de julio de dos mil veinticuatro.

"SIEMPRE AUTÓNOMA. POR MI PATRIA EDUCARÉ"

Dra. Alejandra Wong Arce
Coordinadora del Programa Educativo de Ingeniería de Bioprocesos
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Teléfono 4448262300 ext. 6535
coordingbio@cq.uaslp.mx

www.uaslp.mx

Av. Dr. Manuel Nava Núñez, 6
Zona Universitaria • CP. 78210
San Luis Potosí, S.L.P.
tel (444) 826-24 40 al 46
fax (444) 826-2372