

Densidad y flexibilidad de dos materiales biológicos elaborados con *Pleurotus ostreatus*

Fabián D. Jiménez Rey¹

¹ Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, 11501-Costa Rica.

E-mail: fabian.jimenez@ucr.ac.cr

Received: 16 July 2024

Accepted for publication: 30 July 2024

Published: 5 August 2024

Editor: Carlos Rojas

Resumen: El presente estudio evaluó primero el crecimiento de *Pleurotus ostreatus* en diferentes sustratos con miras al análisis de materiales biológicos funcionales en aplicaciones ingenieriles. Una vez determinados los mejores sustratos, se construyeron dos materiales ligeramente diferentes y se determinó y analizó el valor promedio de la densidad y la flexibilidad de estos. Estos últimos valores fueron comparados con los reportados para el poliestireno expandido. Los valores mayores de densidad fueron registrados en muestras de un material hecho con una mezcla de granulometrías de pasto de arroz, con un promedio de 132 kg/m³, mientras que el esfuerzo máximo a la flexión lo presentó un material en el cual se utilizó una mezcla de pasto de arroz grueso con bagazo de caña de azúcar, con valores de 0.08 MPa. Es claro que los materiales construidos, y en forma general, los materiales hechos con el hongo y las biomásas evaluadas, tienen un potencial ingenieril que es discutido.

Palabras clave: biomasa, industria, inóculo, sostenibilidad.

Abstract: This study started evaluating the growth of *Pleurotus ostreatus* on different substrates with the intention of developing biological materials that can be used for engineering applications. Once this step was completed, the average density and flexibility of two materials were determined and analyzed. These two properties were compared with those reported for expanded polystyrene. The highest density values were observed on a material constructed with a mixture of two granulometries of rice hay, with an average value of 132 kg/m³, whereas the maximum flexibility effort was observed on a material made with both rice hay and sugar cane bagasse, with a value of 0.08 Mpa. It seems clear that the constructed materials, and other ones made with fungi and plant biomass, have great potential for engineering applications.

Keywords: biomass, industry, inoculum, sustainability.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Introducción

Los hongos son organismos con una gran gama de funciones y actualmente, por estas múltiples capacidades, son relevantes para distintas aplicaciones ingenieriles. El potencial de degradación de moléculas complejas en sustancias más simples, por ejemplo, es una de estas últimas. Muchos hongos son capaces de degradar sustancias tóxicas y son utilizados en la recuperación de suelos contaminados con

metales pesados o en procesos de descontaminación de aguas residuales con fármacos (Rodríguez Rosario 2005; Enríquez et al. 2015; Anderson 2016). Otros hongos son capaces de descomponer sustancias como el poliuretano, cuya degradación natural es extremadamente lenta (Rodríguez y Rodríguez 2018).

Debido a dicha capacidad natural de degradación de sustancias, el uso de hongos ha capturado el interés de la industria y actualmente existen diferentes líneas de trabajo con este grupo de organismos. Una de ellas es la degradación de residuos orgánicos provenientes de las actividades agrícolas y forestales. Latinoamérica cuenta con una amplia matriz de residuos de este origen (CEPAL 2021) y en general estos materiales son utilizados en aplicaciones como abonos, coberturas, alimentación animal y producción de energías. Sin embargo, un alto porcentaje de las fincas regionales no lleva a cabo ningún tratamiento de residuos agrícolas, lo que aumenta el riesgo para la salud de las personas y los animales debido al manejo inadecuado de los mismos. Lo anterior puede generar la proliferación de plagas pues muchos de estos residuos son dispuestos libremente al ambiente para su degradación, como sucede en Costa Rica (INEC 2014). Sus efluentes, incluso, pueden percolarse en el suelo, produciendo problemas de contaminación.

Dentro de ese contexto, el hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) es un organismo que por sus características bioquímicas puede ser usado para la creación de materiales biológicos a partir de residuos agroforestales y con ello dar un manejo inteligente a estos últimos. Lo anterior es posible debido a la capacidad del hongo de unir trozos de material biomásico por medio del crecimiento hifal (Aranda Calipuy y Roncal Lazaro 2022). Este hongo, además de ser comestible, es un descomponedor primario que degrada la lignina y celulosa, por medio de las enzimas hidrolíticas que libera para luego absorber los nutrientes y crecer (Armstrong y Liaw, 1972). El crecimiento del micelio se da por la extensión de la membrana y la pared celular en la punta de las hifas (Bartnicki-Garcia 1968) y su crecimiento se favorece a temperaturas entre 25 y 28°C, una humedad relativa de aproximadamente 80% (Miles y Chang 2004) y una concentración de CO₂ alta (Dharmesh et al. 2016). En estas condiciones, la biomasa vegetal y las hifas forman un conglomerado que se autoensambla y crece en un corto periodo (Coello 2011), convirtiéndose en un material biológico de interés.

Bajo este panorama de búsqueda de alternativas a los procesos de gestión de residuos orgánicos agrícolas, el presente trabajo ha sido desarrollado como una estrategia para evaluar algunas propiedades físico-mecánicas de materiales hechos con un hongo comercial. El objetivo general de esta iniciativa ha sido ofrecer insumos técnicos para la determinación del potencial de uso real de esta tecnología en aplicaciones de mercado. Este trabajo se basó en la premisa de ofrecer ideas de aplicación a la matriz hongo-sustrato para procesos comerciales de producción de materiales biológicos.

Materiales y métodos

Este proyecto se llevó a cabo entre los años 2017 y 2018 en Costa Rica. Primero, se llevaron a cabo una serie de pruebas preliminares en el Laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, que consistieron en la siembra del hongo *Pleurotus ostreatus* en matrices de a) bagazo de caña (*Saccharum officinarum*), b) pasto de arroz (*Oryza sativa*), c) granza de arroz, d) raquis de banano (*Musa* sp.) y aserrines de e) guapinol (*Hymenaea courbaril*), f) pino (*Pinus radiata*), g) teca (*Tectona grandis*), h) roble coral (*Terminalia amazonia*) e i) guanacaste blanco (*Enterolobium cyclocarpum*). El objetivo de estas pruebas preliminares fue la selección de dos sustratos sobre los cuales se realizaría el resto del trabajo.

Los criterios bajo los cuales se realizó la selección de las mejores alternativas se basaron en i) una evaluación cualitativa visual de la rapidez, el porcentaje y uniformidad de la superficie cubierta por el micelio en el sustrato, y ii) la consistencia al tacto de los materiales obtenidos al final del proceso de incubación. Un tercer criterio, de menor peso para la elección de los sustratos consistió en que los mismos fueran de fácil obtención, y que además constituyeran importantes residuos agrícolas.

Inducción de crecimiento micelial y tratamientos experimentales

La metodología utilizada para el crecimiento de biomasa micelial se basó en las técnicas comunes llevadas a cabo para la producción de hongo ostra como alimento (Miles y Chang 2004; Donado Parada 2014). Tal procedimiento se adaptó, sin embargo, usando recipientes de aluminio para alimentos de 20 x 10 cm, que sirvieran como molde para la formación del material biológico.

De acuerdo con los resultados de las pruebas preliminares, se utilizaron únicamente los residuos del bagazo de caña y pasto de arroz para el resto del trabajo. Ambos sustratos se sometieron a un proceso de secado en una estufa para materiales foliares por 48 horas a 60°C para favorecer el proceso de molienda. Los sustratos debidamente secos fueron molidos por medio de un molino de cuchillas marca Thomas Scientific, Wiley Mill, Modelo 4 con una malla de orificios de 5 mm para obtener partículas de ese tamaño y más pequeñas.

Los sustratos molidos fueron a su vez separados en dos grupos por medio de un tamiz número 14 marca U.S. Standard Sieve Series, con orificio de 1.41 mm. Tras este proceso, se obtuvieron partículas con dos granulometrías distintas; una granulometría “gruesa” de partículas entre 1.41 mm y 5 mm, y una granulometría “fina” de partículas entre 1.41 mm y de menor tamaño. Las granulometrías seleccionadas para los ensayos finales fueron el bagazo fino (no el grueso) y el pasto de arroz tanto fino como grueso.

Las dos biomásas secas, molidas y clasificadas por tamaño, así como el resto de los implementos usados en la incubación posterior, fueron esterilizados a 121°C y 15 PSI por 30 minutos en una autoclave modelo SA-500 de Sturdy Industrial Co. Luego del proceso de esterilización, el sustrato se sacó de la autoclave y se dejó enfriar a temperatura ambiente en una cámara de flujo laminar marca Bioquest Biological Cabinet, modelo 60474 por 20 minutos.

El inóculo de *Pleurotus ostreatus*, variedad PL1, fue obtenido de una empresa comercial y se mantuvo empacado en su bolsa de polipropileno en refrigeración a 4°C hasta el momento de su utilización, cuando fue sacado del refrigerador y mantenido a temperatura ambiente por 1 hora. Debidamente desinfectado el sustrato y a temperatura ambiente, se realizó la siembra del inóculo en la cámara de flujo laminar con el fin de reducir la posibilidad de contaminación.

Los diferentes tratamientos experimentales consistieron en realizar mezclas de los dos distintos sustratos y sus respectivas granulometrías para posteriormente agregar el inóculo del hongo. Así, los tratamientos de mezclas de sustrato fueron denotados como T1 para la mezcla de 50% bagazo fino y 50% pasto grueso y T2 para la mezcla de 50% pasto de arroz fino y 50% pasto de arroz grueso (porcentajes en relación masa/masa). No se usó la combinación de pasto fino con bagazo fino por no mostrar buenos resultados. Para este experimento se sembraron ocho réplicas de cada tratamiento para un total de 24 unidades individuales de experimentación. Estas mezclas de sustratos y granulometrías fueron

seleccionadas para medir el efecto de estos dos factores en las propiedades físicomecánicas del material obtenido.

La cantidad de sustrato húmedo utilizado en cada muestra fue de aproximadamente 300 g, medidos con balanza electrónica. La siembra con el hongo consistió en incorporar 60 g de inóculo de hongo ostra certificado, equivalente a un 20% del peso húmedo del sustrato en un beaker de 300 mL. La mezcla fue agitada manualmente para homogenizarla y distribuir el inóculo en todo el sustrato. La siembra se realizó colocando la mezcla mencionada en los recipientes de aluminio rectangulares que funcionaron como molde para la formación del material.

El material preparado fue formado a partir de una serie de capas de la matriz sustrato-hongo separadas por mallas metálicas de dimensiones 19.5 x 9.5cm y orificios de 2 mm de diámetro. Para ello, se procedió a la colocación de una capa de 0.4 cm de matriz sustrato-hongo en el recipiente, sobre la cual se colocó una malla metálica. Tras ello, se colocó una capa de 0.7 cm de matriz sustrato-hongo y una malla metálica, seguidas de otra capa de 0.7 cm de matriz sustrato-hongo. Finalmente se colocó una malla metálica y una última capa de 0.4 cm de matriz sustrato-hongo. El bloque de un espesor aproximado de 2.2 cm, se compactó ejerciendo una presión uniforme y distribuida en toda el área con un peso de 1 kg sobre la parte superior por un tiempo de 1 minuto con el fin de eliminar espacios vacíos entre las partículas, con lo que se logró disminuir el espesor a un promedio de 2 cm.

Los bloques fueron introducidos en bolsas de polipropileno que se cerraron y posteriormente fueron colocados dentro de una incubadora marca Hotec, modelo 624HD a 25°C y 80% HR. Las muestras se humedecieron con un atomizador por un periodo de 15 días usando 10 ml de agua destilada cada 3 días. A los 15 días de la inoculación inicial, se procedió a sacar el molde de las bolsas y las muestras se colocaron en la incubadora por 18 días más, humedeciendo el material cada 3 días con 10 ml de agua destilada por muestra con el atomizador asegurando cubrir toda el área. El tiempo total de incubación fue de 33 días hasta que el micelio cubrió por completo el sustrato. Al cabo de 33 días se procedió a deshidratar el material con el fin de detener el crecimiento del hongo en un horno marca Digisystem Laboratory Instruments Inc. Modelo DSO-3000DF a 60°C por 24 h.

Pruebas físicomecánicas del material obtenido

Los materiales obtenidos de la sección anterior se caracterizaron con pruebas de flexión y densidad en el laboratorio de estructuras del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica.

Las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con los métodos de las normas ASTM C303-10 y C203-05 para la determinación de las dimensiones y densidad de aislamientos térmicos de tipo bloque y tableros preformados y para la determinación de cargas de ruptura y propiedades de flexión de aislamientos térmicos de tipo bloque, respectivamente. Dado que ambas normas se utilizan para la medición de propiedades a flexión del poliestireno expandido y a que el material desarrollado presenta cierta similitud con este polímero, se realizó también una comparación de las propiedades medidas en relación con este material.

Para la medición de la densidad, lo primero que se hizo fue estandarizar las dimensiones de las muestras, cortando cuatro de sus caras con una sierra de cinta para madera (dos cortes a lo ancho y dos a lo largo) hasta obtener superficies más homogéneas sobre las cuales realizar la medición de las dimensiones. Este proceso no generó ningún daño evidente en el material al realizar el corte a la malla metálica. Según la norma C303-10, es posible llevar a cabo un proceso de secado previo a la medición de la densidad con el fin de eliminar la humedad remanente en el material, sin embargo, este proceso de secado no se realizó debido a que las muestras fueron procesadas inmediatamente después de haberse llevado a cabo el proceso final de deshidratación para la obtención del material.

Para la medición de las dimensiones se utilizó un vernier de 300 mm, y se realizaron dos mediciones de longitud, dos del ancho y cuatro del espesor. Este proceso se hizo sin deformación en el material y para la medición de la masa se utilizó una balanza electrónica marca Precisa, modelo 1000c-3000d.

Por su parte, el equipo utilizado para las pruebas de flexión fue de la marca MTS Landmark, modelo Servohydraulic Test System de 25 kN. Esta prueba se realizó según un protocolo diseñado para materiales que fallan a pequeñas deflexiones. Para ello, el material a evaluar se colocó sobre dos soportes paralelos y se ejerció fuerza perpendicular al mismo a una distancia media entre los soportes, con una cruceta. Según la norma C203-05, este método funciona para la medición del módulo de ruptura y carga de ruptura, los cuales son útiles para inspección del control de calidad y para fines de especificaciones del material (ASTM C203-99).

La distancia entre los soportes se determinó cumpliendo las siguientes relaciones:

$$20 \geq L/d \geq 2 \quad (1)$$

$$L/b \geq 0.8 \quad (2)$$

$$b/d \geq 1 \quad (3)$$

En donde L es la distancia entre los soportes (valor inicial de 125 mm), d es el espesor de la muestra (20 mm como promedio) y b corresponde al ancho promedio de las muestras (99 mm). Con estos valores el resultado de (2) es 6.25 y el de (3) es 4.95.

Luego, se determinó también la velocidad requerida de aplicación de la fuerza por parte de la cruceta. Para lo anterior se usó la siguiente fórmula:

$$R = (ZL^2)/(6d) \quad (4)$$

En donde R es la velocidad de la cruceta (mm/minuto), L es la distancia entre soportes (mm), d es el espesor de la muestra (mm) y Z es una tasa de deformación de la fibra exterior (mm/mm*minuto) que debe ser igual a 0.01.

En este caso, se obtuvo que la velocidad de la cruceta debería de ser 1.35 mm/minuto.

Posteriormente se determinó que el ensayo debía detenerse si la máxima deformación unitaria en las fibras exteriores alcanzaba el valor de 0.05 mm/mm, por lo que la deflexión máxima permitida en el centro de la muestra se calculó por medio de:

$$D=(\epsilon L^2)/(6d) \quad (5)$$

En donde D es la deflexión en el centro de la muestra (mm), d es el espesor de la muestra (mm), ϵ es la deformación unitaria (0.05 mm/mm en este caso) y L es la distancia entre los soportes (mm).

En este caso, se obtuvo un valor de 6.75 mm para la deflexión al centro de la muestra. Este valor fue utilizado para todas las pruebas.

De manera similar al procedimiento anterior, para cada una de las muestras se calculó el esfuerzo máximo de las fibras por medio de:

$$S=(3PL)/(2bd^2) \quad (6)$$

En donde P es la carga en algún punto dado de la curva fuerza-deformación (N), L es la distancia entre los soportes (mm), b es el ancho de la muestra (mm), d es el espesor de la muestra (mm) y S es el esfuerzo en las fibras (MPa).

El máximo esfuerzo en las fibras mide la resistencia a la flexión en las fibras del material. Por ejemplo, para el poliestireno expandido, los valores para este parámetro rondan entre 0.172 MPa y 0.52 MPa, dependiendo de la densidad y tipo (Dyplast 2017).

Dado que la mayoría de los diagramas de fuerza-deformación mostraron linealidad, resultó adecuado tomar como P, la fuerza máxima aplicada sobre la muestra. Así, se recalculó la máxima deformación en las fibras para corroborar que se cumplieran una deformación unitaria de 0.05 mm/mm con:

$$\Delta=(6Dd)/L^2 \quad (7)$$

En donde Δ es la máxima deformación de las fibras o deformación unitaria (mm/mm), D es la deflexión en el centro de la muestra (mm), d es el espesor de la muestra (mm) y L es la distancia entre los soportes (mm).

El momento de inercia para cada muestra se calculó con:

$$I=(bd^3)/12 \quad (8)$$

En donde I es el momento de inercia (mm⁴), b es el ancho de la muestra (mm) y d es el espesor de la muestra (mm).

Finalmente se determinó el módulo elástico con

$$E=(PL^3)/(48ID) \quad (9)$$

En donde P es la fuerza máxima aplicada sobre la muestra, L es la distancia entre los soportes (mm), I es el momento de inercia (mm⁴) y D es la deflexión en el centro de la muestra (mm).

El módulo de elasticidad o de Young (ecuación 9) representa la proporción inicial recta del diagrama de esfuerzo-deformación unitaria, hasta el límite de proporcionalidad. Esta propiedad mecánica indica la rigidez de un material, por lo que materiales muy rígidos como el acero, llegan a tener módulos

elásticos de hasta 200 GPa, mientras que materiales como el hule vulcanizado, puede llegar a tener módulos elásticos de 0.70 MPa (Hibbeler 2006).

Los cálculos finales de datos finales de densidad y flexión fueron analizados por medio del programa estadístico Past, versión 3.21. Tras estudio de la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y un α de 0.05, se escogió analizar las diferencias en los valores físico-mecánicos obtenidos por medio de pruebas de t de Student, que son útiles para medir las diferencias entre dos muestras independientes y pequeñas con distribución normal y homogeneidad en sus varianzas. También se calcularon los coeficientes de variación, y se compararon los valores de densidad, esfuerzo en las fibras y el módulo de elasticidad entre los materiales desarrollados y los valores medios reportados para poliestireno expandido, dado que este último presenta semejanzas texturales y estructurales similares al material biológico desarrollado.

Resultados y discusión

Es este trabajo se logró producir un material biológico con características de reproducibilidad (Fig. 1) a mediana o gran escala. Este escalamiento, sin embargo, debe ser sujeto a pruebas para tal fin. En todo caso, según los resultados obtenidos de las pruebas preliminares realizadas, la colonización fue deficiente en sustratos como la teca, el roble coral y el guanacaste blanco. En estos casos, es posible que la composición química o la presencia natural de resinas en el aserrín de algunas de estas maderas pudieran haber afectado el crecimiento micelial. Esto pudo haber derivado en una baja rapidez o uniformidad de colonización y una consistencia poco favorable al tacto. En el caso del raquis de banano, la presencia de fungicidas con efecto residual aplicados en campo, o la efectividad misma de los lixiviados del raquis (Garcés 2010), pudo haber afectado parcial o totalmente la colonización del hongo ya que en este caso no hubo crecimiento micelial.

En todos los casos con presencia de granza de arroz, la contaminación con *Trichoderma* sp. fue evidente a pesar de que el material fue esterilizado previamente bajo las mismas condiciones de temperatura y tiempo que el resto de los sustratos. Sin embargo, en estos casos, es posible que, por las características anatómicas de la granza, la inocuidad de tal biomasa no fuera completa. En contraste, algunos sustratos como el pino o el guapinol, presentaron una rapidez y uniformidad de crecimiento medio y una consistencia al tacto relativamente buena por lo que en un inicio fueron considerados para ser utilizados en las pruebas finales. Estos resultados se incluyen acá como una forma de potenciar experimentación futura con estas biomásas.

A pesar de todo lo anterior, vale la pena mencionar que por observación del proceso, mínimas variaciones en algún parámetro (por ejemplo temperatura o humedad relativa) pueden resultar en cambios drásticos en la rapidez y uniformidad de colonización micelial (Coto-López et al. 2023). Esto evidencia la complejidad de trabajar con organismos vivos que dependen enormemente de condiciones específicas para su desarrollo y que con ello afectan las propiedades de materiales biológicos de este tipo. Esta observación supone una gran limitación que debe ser superada antes de iniciar procesos industriales de producción de materiales biológicos como el realizado acá. En todo caso, también producto de la observación realizada acá, un parámetro que podría ser interesante de controlar sería el CO₂ en la cámara de incubación, que podría ser de bastante utilidad para optimizar el proceso de crecimiento.

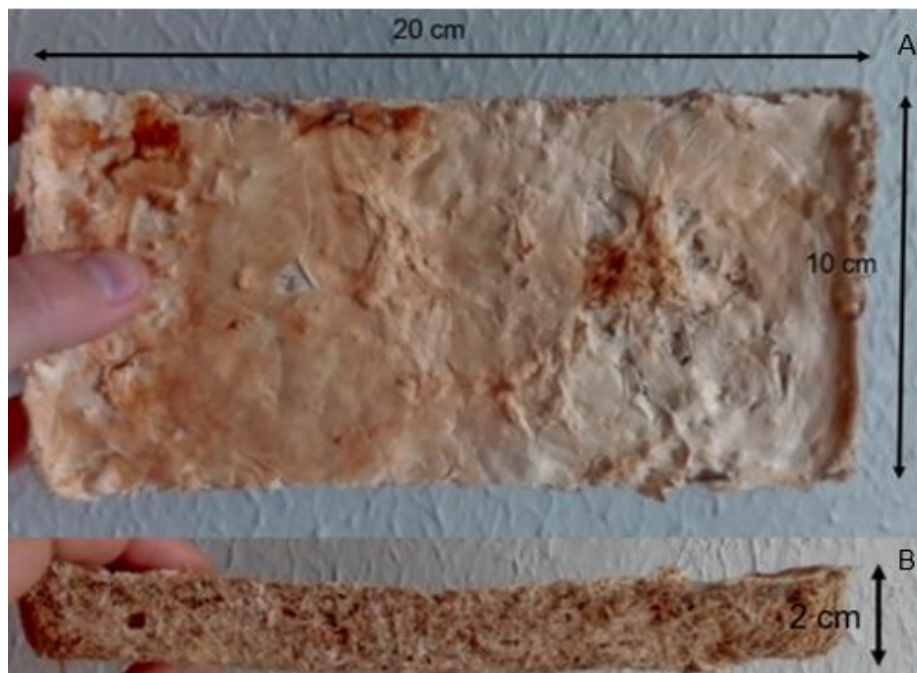


Figura 1. Vistas superior (A) y lateral (B) así como dimensiones reproducibles de uno de los bloques de material biológico construidos en este estudio.

Pruebas físico-mecánicas

Al analizar las propiedades físico-mecánicas de los materiales construidos se encontró que la máxima densidad fue registrada para el material T2 elaborado con una mezcla de 50% pasto fino con 50% pasto grueso (Cuadro 1). Lo anterior fue registrado a pesar de que las dimensiones de las muestras evaluadas fueron un poco (pero no significativamente) menores a lo esperado. Cuando se analizó el valor de densidad para cada uno de los materiales, se observó que el promedio para el material T1 fue un 16% menor con respecto al promedio para el material T2, lo que se asocia directamente a la densidad del sustrato, ya que el pasto de arroz es más denso que el bagazo.

Cuadro 1. Valores promedio (y desviaciones estándar) asociados con las variables registradas para determinar la densidad del material en el estudio presente.

Material	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Masa (g)	Densidad (kg/m ³)
T1	204.6 (0.8)	98.0 (1.0)	20.0 (0.6)	45.9 (1.6)	114.5 (2.2)
T2	203.1 (2.3)	96.4 (0.9)	18.6 (0.6)	48.3 (1.5)	132.7 (2.2)

El promedio de la densidad de ambos tipos de material es mayor que el reportado para el poliestireno expandido, del cual se registran valores entre 16 y 48 kg/m³ (Hibbeler 2016) dependiendo de

su tipo y composición pero concuerda con otros valores reportados para materiales hechos de la misma forma que en este estudio, cuyo promedio fue de 129.5 kg/m^3 (Aranda Calipuy y Roncal Lazaro 2022).

Otros materiales biológicos como la madera muestran una densidad directamente proporcional con su resistencia mecánica (Sccarello 2010), por lo que se esperaría que los bloques de material biológico desarrollados presentaran características mecánicas mejores que las del poliestireno expandido al ser más densos que este último. De igual forma algunas investigaciones han encontrado que en materiales como el plywood el cual se compone de partículas conglomeradas de madera, existe una correlación similar entre la densidad y la resistencia a flexión perpendicular (Tenorio et al. 2012). Esta misma relación se debió haber cumplido de haber existido una mejor colonización del hongo en el sustrato.

Cuando se hicieron las pruebas de flexión, se observó que el máximo esfuerzo en las fibras fue registrado para el material T1 (Cuadro 2). Es interesante analizar que para el poliestireno expandido, se han registrado valores de módulo de elasticidad entre 1.24 y 3.45 MPa, para las densidades reportadas y cumpliéndose una relación directa de proporcionalidad entre la densidad y la resistencia a la flexión (Dyplast 2017). Los valores del módulo elástico registrados en los materiales construidos en este estudio estuvieron dentro del rango registrado para el poliestireno expandido. Estos valores también fueron mayores que el valor promedio de 0.68 MPa reportado para el módulo elástico de materiales hechos con bagazo pero sin malla (Aranda Calipuy y Roncal Lazaro 2022). De esta forma, al analizar tanto el valor del módulo elástico como el de densidad, se puede observar que los materiales creados en este estudio tienen mayor flexibilidad para la densidad medida. En otras palabras, son materiales densos pero moderadamente flexibles. Debido a su baja resistencia a la flexión, las posibles aplicaciones de este material en la ingeniería no deberían ser de tipo estructural, pero podrían ser útiles como aislamientos térmicos y acústicos o en la fabricación de material para embalaje o vajillas desechables.

En este trabajo no se determinó directamente si la utilización de la malla metálica tuvo algún efecto positivo o negativo en el desarrollo del material y sus propiedades mecánicas. Sin embargo, el trabajo de Aranda Calipuy y Roncal Lazaro (2022) realizado sin malla, sugiere que este elemento tiene un impacto estructural que debe de tomarse en cuenta para la búsqueda de aplicaciones. Consecuentemente, es crucial realizar una comparación experimental de las propiedades físicomecánicas entre muestras que no contengan ningún tipo de malla o elemento con muestras que contengan estas mallas u otros componentes estructurales internos como refuerzos longitudinales de distintos materiales y calibres. Solamente así se podría comparar el crecimiento del hongo y la resistencia a la flexión o compresión del material, la cual podría ser mayor o menor, para poder dirigir una potencial producción en la dirección de la aplicación que se le quiera dar al material.

Cuadro 2. Valores promedio (y desviaciones estándar) asociados con las variables registradas para medir flexión del material en el estudio presente.

Material	Máximo esfuerzo en las fibras (MPa)	Módulo elástico (MPa)
T1	0.08 (0.01)	1.54 (0.23)
T2	0.07 (0.01)	1.31 (0.23)

Análisis estadísticos con respecto al poliestireno expandido

Al analizar estadísticamente los valores asociados con las pruebas realizadas sobre los dos tipos de material construido, se encontraron diferencias significativas entre la densidad de ambos ($t=15.293$, $P<0.05$), siendo mayor la densidad de T2. El coeficiente de variación para la densidad de los materiales fue de 1.93 para el material T1 y de 1.67 para el material T2. Se observó que en ambos casos, la variabilidad asociada con la densidad determinada fue baja. Al realizar la comparación entre los dos materiales desarrollados y la densidad del poliestireno expandido tipo I, se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas en ambos tipos de muestras, siendo mayor la densidad de ambos materiales construidos ($t=119.6$, $P<0.05$ y $t=140.9$, $P<0.05$ para la comparación entre T1 vs poliestireno y T2 vs poliestireno, respectivamente).

Se encontraron diferencias significativas para el esfuerzo máximo en las fibras de los materiales ($t=2.249$, $P<0.05$), siendo mayor este parámetro en el material T1. En este caso, el coeficiente de variación fue de 12.6 para el material T1 y de 17.3 para el material T2. Al realizar la comparación entre el esfuerzo máximo a la flexión en las fibras de los dos materiales desarrollados y la del poliestireno expandido tipo I, se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas en el esfuerzo de flexión en ambos tipos de muestras, siendo mayor el esfuerzo a la flexión en el poliestireno expandido ($t=-28.62$, $P<0.05$ y $t=28.03$, $P<0.05$ para la comparación T1 vs poliestireno y T2 vs poliestireno, respectivamente).

De forma interesante, no se encontraron diferencias significativas entre los valores del módulo de elasticidad para ambos materiales ($t=1.8796$, $P>0.05$). En este caso, los coeficientes de variación fueron más altos, con valores de 14.73 para el material T1 y de 17.3 para el material T2. Dado que no existió variación en la composición química de los sustratos utilizados a lo largo de las pruebas en el estudio, los principales factores a los cuales se les atribuye la alta variabilidad en los datos de máximo esfuerzo a la flexión y módulo elástico fueron el manejo del proceso (tipo de molde, mallas utilizadas) y los parámetros de ambiente controlado (temperatura y humedad relativa).

Finalmente, es interesante observar que al realizar la comparación entre el módulo de elasticidad de cada uno de los materiales desarrollados y la del poliestireno expandido tipo I, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en este parámetro.

Perspectivas de uso futuro

Con base en lo encontrado en el presente estudio y otras investigaciones similares (p.e. Aranda Calipuy y Roncal Lazaro 2022), los materiales biológicos hechos a partir de una combinación de biomasa agroindustrial y el hongo *Pleurotus ostreatus*, tienen potencial de aplicación ingenieril. De hecho, el trabajo de Coto-López et al. (2023) dirigido a usar este material como filtro de aguas con arsénico ya apuntó en esa dirección. Desde este punto de vista, es necesario continuar elaborando estos materiales y determinando sus características. Este trabajo se enfocó en dos propiedades físico-mecánicas, pero otros estudios futuros pueden evaluar propiedades químicas o incluso biológicas de estos conglomerados.

Un tema interesante para estudio futuro podría ser el estudio de las propiedades térmicas de estos materiales. Algunas de ellas, como la conductividad térmica y el calor específico pueden ofrecer ventajas comparativas con respecto a un material como el poliestireno expandido, que es inflamable y emana gran cantidad de gases contaminantes cuando se quema. En pruebas preliminares hechas como parte de este

trabajo pero no mostradas acá, los materiales creados acá no presentaron inflamabilidad y más bien se comportaron como paneles con resistencia al fuego. De igual forma, las propiedades de comportamiento a la compresión y de aislamiento acústico deberían de ser estudiadas en los materiales creados con metodologías similares. En el estudio de estas propiedades y en la caracterización completa de los elementos físico-mecánicos, existe todavía un amplio panorama de evaluabilidad de este tipo de materiales, por lo que se recomienda su estudio en futuras investigaciones.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Laboratorio de Fitopatología y del Laboratorio de Entomología de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional en Costa Rica por el préstamo de equipo y ayuda con espacio de trabajo. En particular, además, se agradece el apoyo de Carlos Rojas, Pedro Rojas Camacho, Paula Sanabria Hernández, Félix Gómez Castillo y Francisco Villalobos por las diferentes ayudas ofrecidas durante el proceso de estudio.

Referencias

- Anderson CE. 2016. Potential of *Pleurotus ostreatus* to remediate diesel-contaminated soil in subarctic mesocosms [tesis]. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks. 55 p. Disponible en: <https://scholarworks.alaska.edu/>
- Aranda Calipuy MMS, Roncal Lazaro AS. 2022. Micelio de *Pleurotus ostreatus* y bagazo de caña de azúcar como biomaterial sustituto de la espuma de poliestireno [Tesis]. Perú: Universidad César Vallejo. 96 p. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/>
- Armstrong S, Liaw J. 1972. Fundamentals of the fungi. *Mycologia* 64(6): 1364-1365.
- ASTM (American Standard Test Materials) C203-99. 1999. Standard test methods for breaking load and flexural properties of block-type thermal insulation. ASTM Internacional.
- Bartnicki-Garcia S. 1968. Cell wall chemistry, morphogenesis and taxonomy of fungi. *Annu Rev Microbiol.* 22(1): 87-108.
- CEPAL. 2021. Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe. San José, Costa Rica: IICA. 128 p.
- Coello J. 2011. Aplicación del hongo *Pleurotus ostreatus* como alternativa para la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados [Tesis]. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. 49 p. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/>
- Coto-López C, Mardones Hidalgo M, Arguilar-Álvarez R, Rojas C. 2010. ¿Podría un biomaterial hecho con micelio de *Pleurotus ostreatus* funcionar como filtro de agua? *Funga Latina* 1: V1A2.

- Dharmesh Gupta S, Reena Chandel K, Kapoor S. 2016. Technology of mushroom production and its postharvest technology. En: Joshi VK, editor. Indigenous Fermented Foods of South Asia. Boca Raton, Florida: CRC Press. p. 717-722.
- Donado Parada T. 2014. Evaluación de tres sustratos para la producción de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) [Tesis]. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. 47 p. Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/>
- Dyplast [Internet]. 2017. EPS Insulation data sheet. Miami: Dyplast Products; [visitado 24 julio 2024]. Disponible en: https://www.ecosmartinc.com/old/productdocs/dpEPS_data_sheets.pdf
- Enríquez F, Camarillo D, Loera O, González I, Chan W, Odín C. 2015. Estudio de la correlación entre actividades enzimáticas de lacasa y manganeso peroxidasa con la remoción de fármacos. Segundo Congreso Nacional AMICA, 2015 Octubre 21-23, Puebla, México.
- Garcés H. 2010. Comparación de la calidad y efectos de lixiviados obtenidos a partir de raquis de banano (*Musa acuminata*) y plátano (*Musa balbisiana*) mediante transformación aeróbica y anaeróbica en condiciones de invernadero [Tesis]. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. 133 p. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/>
- Hibbeler RC. 2006. Mecánica de Materiales. 6a ed. Mexico: Prentice Hall. 706 p.
- INEC [Internet]. 2014. Total de fincas con actividad agrícola por principal tipo de tratamiento de residuos, según provincia y tamaño de la finca en hectáreas, Costa Rica: Censo Agropecuario 2014; [visitado 24 julio 2024]. Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E16-10581.pdf>
- Miles GP, Chang ST. 2004. Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact. Boca Ratón, Florida: CRC Press. 478 p.
- Rodríguez Rosario KJ. 2005. Eficacia del hongo *Pleurotus ostreatus* como biorremediador de suelos contaminados con metales pesados [Tesis]. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico. 74 p. Disponible en: <https://scholar.uprm.edu/>
- Rodríguez A, Rodríguez Y. 2018. Biodegradación de poliuretano mediante el uso del hongo *Pestalotiopsis microspora*. [práctica de graduación]. Barancabermeja, Colombia: Instituto Universitario de La Paz. 14 p. Disponible en: <http://academia.edu>
- Sccarello MV. 2010. La madera desde su conocimiento hasta su conservación. Bolivia: Editorial Gente Común. 41 p.
- Tenorio C, Moya R, Camacho D. 2012. Propiedades físico-mecánicas de tableros terciados construidos con especies tropicales de plantaciones para uso estructural. CERNE 18(2): 317-325.