

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de biocompuesto a partir de hongos locales y desechos agrícolas para
aplicaciones en arquitectura de interiores

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero/a en Materiales

Presentado por:

Aarón Eduardo Villacis Arroyave

Angie Michelle Mendoza López

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo al M.Phil. David Reyes por impulsarnos constantemente a mejorar nuestras destrezas y ampliar nuestros conocimientos en la apasionante carrera de Materiales. También, a la M.Sc. Elizabeth Aigaje por abrirnos las puertas al estudio de este campo tan vasto de los biomateriales. Asimismo, a nuestro tutor, el Ph.D. Andrés Rigail por sus continuas y valiosas ideas sobre el reajuste de nuestro proyecto para potenciar su impacto. Y, por último, a la Ph.D. Daynet Sosa por brindarnos la oportunidad de participar en esta serie de contribuciones conjuntas entre las carreras de Materiales y Biología en búsqueda de un biocompuesto 100% verde a partir de micelio de hongos.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mis padres Raúl y Sofía por su continuo soporte y comprensión con las adversidades de mi etapa universitaria. También a mi abuelo Arnulfo por demostrarme lo apasionante que es la investigación y darme la oportunidad de honrarlo con este trabajo. Agradezco a mis amigos, compañeros, profesores y mentores de la carrera de Materiales y de mi colegio por acompañarme en esta travesía y permitirme compartir con ellos momentos inolvidables. Por último, agradezco a Neo y a Diva, mis perros, por su cariño y por estar conmigo en los momentos más duros de mi carrera universitaria.

Agradezco a mi mamá Angela y a mi abuelita Gladys por haberme dado todo el apoyo necesario para sacar adelante mi carrera. Un agradecimiento especial a mi mejor amigo Elías, quien siempre estuvo para ayudarme ante cualquier dificultad que enfrentara durante mis estudios. Y, por último, agradezco a mis amigos, profesores y tutores que conocí a lo largo de mi etapa universitaria y que hicieron de esta una experiencia gratificante, llena de buenos momentos y conocimiento para nunca olvidar.

Declaración Expresa

Nosotros, Aarón Eduardo Villacis Arroyave y Angie Michelle Mendoza López, acordamos y reconocemos que la titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 8 de marzo del 2024.



Aarón Eduardo Villacis
Arroyave



Angie Michelle Mendoza
López

EVALUADORES

David Reyes Ortiz, M.Phil.

Profesor de Materia

Andrés Rigail Cedeño, Ph.D.

Tutor de proyecto

RESUMEN

La acumulación de residuos plásticos, especialmente espumas poliméricas, plantea un conflicto ambiental en Ecuador, por ser materiales no biodegradables y de difícil reciclaje. El aumento de residuos agrícolas como la cascarilla de arroz influye en la contaminación ambiental al incinerarse el 65% del total producido. Este proyecto se enfoca en el diseño de un biocompuesto a partir de desechos agroindustriales y de micelio de hongos para su incorporación en arquitectura de interiores como alternativa a espumas poliméricas.

Se generaron tres geometrías diferentes del biocompuesto, el cual fue sintetizado con la cepa *Trametes sanguinea* del micelio de hongo y cascarilla de arroz gruesa como sustrato. Las muestras generadas tenían recubrimiento de concreto y acero galvanizado para comparar con el biocompuesto solo. Los resultados obtenidos para propiedades físicas, mecánicas, acústicas y térmicas, demostraron que el biocompuesto no destaca en propiedades mecánicas en comparación con las espumas poliméricas, sin embargo, al alcanzar niveles de aislamiento acústico competitivos frente a las espumas y un comportamiento de autoextinción frente a la llama, lo vuelven una alternativa innovadora y sostenible para aplicaciones de diseño de interiores.

El prototipo elaborado a partir del biocompuesto y con recubrimiento de concreto es la alternativa que destacó en criterios como la atenuación del ruido, inflamabilidad, precio y facilidad de conformación, siendo esta la alternativa más viable para implementar en interiores.

Palabras Clave: biomaterial, micelio, aislamiento acústico, flamabilidad

ABSTRACT

The accumulation of plastic waste, especially polymeric foams, poses an environmental conflict in Ecuador due to being non-biodegradable materials and challenging to recycle. The increase in agricultural residues, such as rice husk, contributes to environmental pollution as 65% of it is incinerated. This project focuses on designing a biocomposite using agro-industrial waste and fungal mycelium for incorporation in interior architecture as an alternative to polymeric foams.

*Three different geometries of the biocomposite were generated, which was synthesized using the *Trametes sanguinea* strain of fungal mycelium and coarse rice husk as a substrate. The generated samples had coatings of concrete and galvanized steel for comparison with the biocomposite alone. Results obtained for physical, mechanical, acoustic, and thermal properties showed that the biocomposite does not excel in mechanical properties compared to polymeric foams. However, it achieved competitive acoustic insulation levels against foams and exhibited self-extinguishing behavior against flames. This makes it an innovative and sustainable alternative for interior design applications.*

The prototype made from the biocomposite with a concrete coating stood out in criteria such as noise attenuation, flammability, price, and ease of shaping, making it the most viable alternative for implementation in interior spaces.

Keywords: biomaterial, mycelium, acoustic insulation, flammability

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Marco teórico	4
1.4.1. Fabricación	5
1.4.2. Biocompuestos	5
1.4.3. Características del biomaterial	7
1.4.4. Aplicabilidad en la arquitectura de interiores.....	8
CAPÍTULO 2	11
2. Metodología	11
2.1. Selección de geometría final del producto	11
2.1.1. Criterios de evaluación	11
2.1.2. Alternativas de diseño	12
2.2. Manufactura del biocompuesto	13
2.2.1. Hongos	13

2.2.2.	Sustratos y su preparación.....	15
2.2.3.	Elaboración de muestras para pruebas físicas, mecánicas y térmicas	15
2.2.4.	Siembra en fundas.....	18
2.3.	Caracterización del biocompuesto	19
2.3.1.	Pruebas físicas	19
2.3.2.	Pruebas mecánicas	20
2.3.3.	Propiedades térmicas y de inflamabilidad	21
2.3.4.	Productos finales y su validación técnica	22
CAPÍTULO 3		23
3.	Resultados y análisis.....	23
3.1.	Propiedades físicas	23
3.1.1.	Análisis de densidad.....	23
3.1.2.	Comportamiento acústico.....	24
3.1.3.	Análisis de Estética	26
3.2.	Propiedades mecánicas	27
3.2.1.	Resistencia a la compresión.....	27
3.2.2.	Resistencia a la flexión	28
3.3.	Propiedades térmicas y de inflamabilidad	29
3.3.1.	Análisis de termogravimetría.....	29
3.3.2.	Comportamiento a la flama	30
3.4.	Análisis económico	32
3.5.	Matriz de decisión final.....	35
CAPÍTULO 4		36
4.	Conclusiones y recomendaciones	36
4.1.	Conclusiones	36
4.2.	Recomendaciones.....	38
Referencias.....		40
Apéndices		45

Apéndice A. Matrices de decisión	45
Apéndice B. Densidad, pérdida de humedad y estabilidad dimensional	50
Apéndice C. Consideraciones y datos para medir nivel de aislamiento acústico	52
Apéndice D. Resultados de panel sensorial	53
Apéndice E. Ensayos mecánicos (compresión y flexión)	55
Apéndice F. Análisis de costos y de inversión	57
Apéndice G. Resultados ensayo de flamabilidad	62

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASEPLAS	Asociación Ecuatoriana de Plásticos
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
MBSC	Mycelium-based Sandwich Composite
MBF	Mycelium-based Foam
ISO	International Organization for Standardization
BS	British Standard
EN	European Standard
IS	Indian Standard
PS	Poliestireno
EPS	Espuma de Poliestireno
XPS	Poliestireno extruido
PU	Poliuretano
EPU	Espuma de Poliuretano
PP	Polipropileno
PDA	Potato Dextrose Agar
CIBE	Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador
TTI	Tiempo hasta la ignición
HRR	Tasa de liberación de calor
TAKM	Temporal average value of maximum level by impulses
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
PRI	Período de Recuperación de la Inversión

SIMBOLOGÍA

cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
cm³	Centímetro cúbico
m	Metro
m²	Metro cuadrado
mm	Milímetro
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grado centígrado
Hz	Hercio
NaClO	Hipoclorito de Sodio
min	Minuto
mL	Mililitro
MPa	Megapascal
N	Newton
dB	Decibel
g	Gramo
kW	Kilowatt
s	Segundo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama sobre el ciclo de vida y la producción de materiales a partir de micelio de hongos	5
Figura 2.1 Fotografía de un panel tipo sánduche con núcleo de Poliuretano de referencia hecho por empresa metalmecánica. [41].	12
Figura 2.2 Apariencia del panel decorativo planteado por Humanante y Estrella [40]	13
Figura 2.3 Colocación de biocompuesto en moldes y secado [14]	13
Figura 2.4 Moldes para cuadrados y prismas de biocompuesto	16
Figura 2.5 Moldes para ladrillos de biocompuesto con su ancho, largo y alto	16
Figura 2.6 Molde para prototipos con paneles tipo sándwich de biocompuesto	17
Figura 2.7 (a y b) a) Trazado de fragmentos sobre lámina de acero galvanizado y b) recorte de fragmentos en lámina de acero galvanizado	17
Figura 2.8 Moldes termoformados de paneles hexagonales con relieves	18
Figura 2.9 Dimensiones de tamaños pequeño y mediano del panel decorativo planteado por Humanante y Estrella [39].	18
Figura 3.1 Curva de pérdida de masa TGA del biocompuesto según ASTM E1131 [47]	30
Figura 3.2 Muestra del biocompuesto sin recubrimiento tras exposición a la llama.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Criterios de diseño y su propósito en la evaluación de alternativas	11
Tabla 2.2 Evaluación del peso específico de cada criterio	11
Tabla 2.3 Identificación de las cepas de hongos recolectadas [42].	14
Tabla 2.4 Tamaños de partícula de la cascarilla de arroz empleada [38]	15
Tabla 3.1 Resultados de pruebas acústicas en productos de biocompuesto y muestra patrón según norma Ch352.Of2000 [44]	25
Tabla 3.2 Porcentaje y escala de aprobación de productos con criterios de análisis sensorial ...	27
Tabla 3.3 Resultados de ensayo de compresión.	28
Tabla 3.4 Resultados de ensayo de flexión	29
Tabla 3.5 Resultados del ensayo de inflamabilidad.	32
Tabla 3.6 Costos fijos y variables de las alternativas de diseño elaboradas con biocompuesto ..	33
Tabla 3.7 Rubros para producción en punto de equilibrio de paneles hexagonales	33
Tabla 3.8 Indicadores económicos y criterios para invertir en decisión	34
Tabla 3.9 Matriz de decisión con las conclusiones respecto al producto final elegido	35

CAPÍTULO 1

1. Introducción

En el último siglo, el crecimiento industrial se ha acelerado debido al desarrollo científico y tecnológico, así como la demanda de recursos para diferentes productos. Esta problemática ha provocado que la sociedad aumente la cultura del desecho, sobre todo de materiales plásticos (de origen petroquímico) que, por sus bajos costos y practicidad, son utilizados ampliamente. Sin embargo, al haber muchas clases de plástico, el proceso de reciclaje resulta difícil y costoso (solo 4% se recicla en Ecuador), disminuyendo la eficiencia del manejo de residuos [1].

La tendencia actual de migrar gradualmente hacia el uso de materiales más ecológicos y sostenibles toma fuerza bajo este escenario. El objetivo principal es reemplazar muchos de los productos de consumo diario y con impacto negativo al medioambiente, ya sea por ser difíciles de reciclar o por el alto consumo energético generado durante su ciclo de vida [2].

Un nuevo campo de estudio es la incorporación de organismos vivos para lograr materiales a partir de recursos naturales. Estos se denominan biocompuestos, los cuales poseen al menos una fase de origen natural. La mayoría de este tipo de materiales ha ganado presencia en diversos tipos de productos al ser sostenibles, biocompatibles y en ocasiones biodegradables con propiedades como elasticidad, porosidad, hidrofobicidad, no inflamabilidad, etc. [3]

Los biomateriales recientemente estudiados son aquellos de origen fúngico, donde el hongo participa como estructura de soporte y el micelio como aglomerante. Al requerir un sustrato como nutriente, se suelen emplear productos lignocelulósicos para su desarrollo. De esta forma, se aprovechan los residuos agroindustriales que, al igual que los desechos plásticos, agravan la contaminación de recursos naturales [4], [5].

Los materiales de micelio tienen gran demanda en la actualidad, sobre todo por su enfoque hacia el modelo de economía circular y han sido objeto de estudio para implementarlos en áreas de construcción, arquitectura, entre otros [6]. Estos biomateriales están aún en desarrollo por lo

que, los procesos de ensayo para la caracterización de sus propiedades son muy variados según la literatura consultada [7]

1.1. Descripción del problema

La acumulación de residuos plásticos es un conflicto medioambiental subestimado, especialmente en Ecuador. El poliestireno y el poliuretano expandidos son materiales sintéticos no biodegradables que, debido a la complejidad del reciclaje químico que requieren, forman parte de los desechos plásticos con mayor generación y disposición en botaderos [8].

Asimismo, con el creciente aumento de la población, la demanda de productos agrícolas como el arroz continúa elevándose diariamente, siendo este cereal el quinto producto con mayor producción en Ecuador [9]. Cabe acotar que, durante el pilado del arroz, se crea un subproducto agroindustrial denominado cascarilla, el cual, así como el arroz, se genera en grandes cantidades. Desafortunadamente, este desecho agroindustrial no está considerado en la gestión de residuos [10]. Por ende, acaba aglomerándose y emitiendo gases de efecto invernadero que afectan a la calidad del aire [11].

La búsqueda de soluciones constructivas más sostenibles, es decir, productos que puedan ser reutilizados y con una menor aportación en huella de carbono, ha generado gran interés en los biocompuestos. Estos son una alternativa en sectores como la construcción y la arquitectura, especialmente, los biocompuestos biodegradables [2]

Este proyecto consiste en el desarrollo de un material biocompuesto con mejor desempeño que las espumas poliméricas comerciales, con el fin de crear una alternativa más sostenible para aplicaciones de diseño arquitectónico.

1.2. Justificación del problema

El poliuretano y el poliestireno expandido son espumas poliméricas utilizadas en el sector de la construcción por ser ligeras y brindar aislamiento térmico y acústico. El sector plástico en Ecuador, según la revista INTEGRA de ASEPLAS (Asociación Ecuatoriana de Plásticos), registró una importación de poliestireno de 7.311,83 toneladas el primer semestre del 2023 [12]. Esto

implica que la industria manufacturera nacional depende fuertemente de la importación de materias primas para fabricar espumas poliméricas. No obstante, el monto es insuficiente para suplir la demanda anual de 7.350 toneladas de espumas rígidas y flexibles [13]. Adicionalmente, estos materiales sintéticos no son biodegradables y, para reciclarlos, se requieren procesos químicos no disponibles nacionalmente. Por tanto, finalizada su vida útil, dichas espumas sintéticas se acumulan como desperdicios, los cuales ocuparon el 15% de plástico desechado que se registró en Ecuador el 2015 [14]. Esto supuso el 11% de los desechos sólidos totales en dicho año, afectando al medioambiente por la prolongada degradación de estos productos derivados del petróleo [13], [15].

Por otro lado, la cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial producido tras el pilado del arroz. El arroz es un producto agrícola de consumo masivo el cual, debido a su creciente demanda, ha favorecido a un incremento en la generación de la cascarilla [16]. Según el MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería), al tercer trimestre de 2019, se generaron 366.418,5 toneladas de cascarilla de arroz a nivel nacional. De dicho monto, solamente el 35% fue reaprovechado, mientras que el 65% restante fue depositado en vertederos o incinerado, formando gases y materiales particulados hacia la atmósfera [11], [17].

Por otra parte, alrededor del Campus Gustavo Galindo Velasco de ESPOL, se encuentran 18 cepas diferentes de hongos. El micelio procedente de dichos hongos con sustratos orgánicos puede emplearse como una alternativa más sostenible que las espumas poliméricas. La cascarilla de arroz facilita la colonización y el crecimiento de las cepas mencionadas, orientándole al micelio a formar estructuras definidas [18]. La creación de este tipo de biomateriales permite minimizar el impacto ambiental debido a los mínimos recursos necesarios para fabricarlos y a su biodegradabilidad. Además, estos biocompuestos son una solución ecoamigable pues, no generan residuos tras su elaboración y, en vez de emitir CO_2 (dióxido de carbono), pueden capturarlo y almacenarlo [19].

Para aprovechar los recursos mencionados, este proyecto propone diseñar un biocompuesto con micelio de hongos locales y sustrato de cascarilla de arroz. El presente biomaterial aprovecha la diversidad de especies fúngicas alrededor de ESPOL y reinserta en la cadena de valor a la cascarilla de arroz para generar un producto más sostenible y con propiedades similares o mejores que las espumas poliméricas.

1.3. Objetivos

En las secciones a continuación, se definen los objetivos del presente proyecto.

1.3.1. *Objetivo general*

Diseñar un biocompuesto a partir de desechos agroindustriales y de micelio de hongos del Bosque Protector La Prosperina, para su incorporación en aplicaciones de diseño interior como alternativa a espumas poliméricas comerciales.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Estudiar las propiedades mecánicas del biocompuesto mediante ensayos de compresión y flexión que verifique su viabilidad en aplicaciones de construcción.
- Comparar las propiedades acústicas del biocompuesto con las de espumas poliméricas comerciales a través de pruebas de transmisión de sonido que contraste su nivel de aislamiento acústico.
- Analizar las propiedades térmicas del biocompuesto por medio de ensayos TGA y de inflamabilidad que verifiquen su comportamiento frente a la llama bajo condiciones controladas de temperatura.
- Realizar un análisis económico que estime los costos asociados al diseño y la fabricación del biomaterial a escala industrial a través de un análisis de punto de equilibrio y evaluación de criterios de inversión.

1.4. Marco teórico

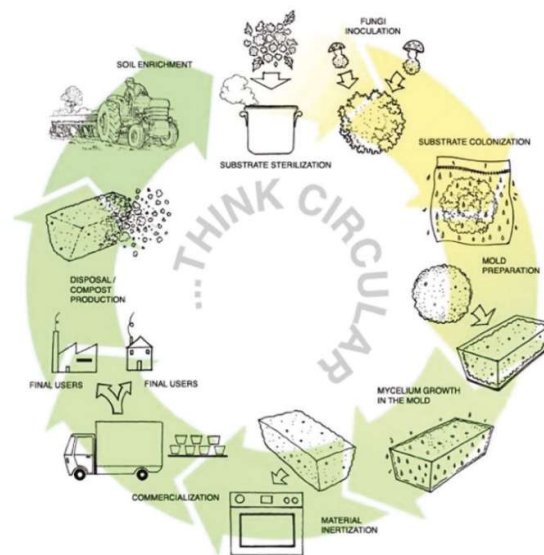
En relación al marco teórico, la fabricación del biocompuesto, su definición, características y aplicabilidad son cuestiones de gran relevancia para comprender el alcance del proyecto de estudio.

1.4.1. Fabricación

La manufactura de biocompuestos a partir de micelio de hongos y residuos agroindustriales consiste en la colonización del sustrato, generalmente formado por un residuo de la agroindustria, por parte de una especie de hongo específica. Dicha colonización permite que el hongo inicie su proceso de crecimiento, el cual se potencia con la aplicación de ciclos de temperatura y presión según como lo indica Girometta en la figura 1.1 [7]. El desarrollo inicial del hongo en el sustrato permite que se forme un material, el cual es introducido en un molde de un producto o pieza determinada con el fin de que termine su proceso de crecimiento en una geometría o forma establecida.

Figura 1.1

Diagrama sobre el ciclo de vida y la producción de materiales a partir de micelio de hongos



1.4.2. Biocompuestos

Un material compuesto es la combinación de diferentes materiales para lograr mejores propiedades. Consta de dos partes, una fase dispersa que se distribuye en un medio continuo llamado matriz [20].

Los biocompuestos se refieren a materiales que tienen una o más fases derivadas de origen biológico como plantas, bacterias, entre otros. Este tipo de materiales incluyen refuerzos como: fibras vegetales (algodón, cáñamo, etc.), o subproductos de cultivos alimentarios [21]. Estos

refuerzos se insertan en matrices poliméricas de origen fósil, las cuales pueden ser termoplásticos vírgenes o reciclados como polietileno y poliestireno. Sin embargo, las matrices pueden ser polímeros derivados de recursos renovables como aceites vegetales o almidones, conocidos como biopolímeros.

Los biocompuestos biodegradables son un nuevo tipo de material denominado “compuesto verde”, constituidos a partir de una matriz proveniente de materia prima biológica y mezclados con desechos orgánicos, asegurando su degradación mediante procesos biológicos. Estos materiales pueden ser biobasados (presentan en su estructura un porcentaje de composición biológica) o biofabricados (requieren de microorganismos como materia prima para su crecimiento) [22].

Los biomateriales basados en materia fúngica son un ejemplo de biocompuestos biofabricados; los hongos son organismos capaces de brindar cohesión mediante la producción de una masa de filamentos microscópicos (llamada hifa) que forman el micelio. Numerosas especies de micelios en biocompuestos se acoplan con sustratos lignocelulósicos para explotar el crecimiento natural del organismo fúngico en residuos agrícolas [23].

1.4.2.1. Hongos y micelios. Se han descrito aproximadamente 120.000 especies de hongos alrededor del mundo, pero podrían existir más de 1,5 millones, lo cual es difícil de precisar debido a su variabilidad de formas y características heterogéneas, que no siempre muestran relaciones filogenéticas definidas [24].

El micelio fúngico es una red compleja de cadenas celulares fibrosas denominadas hifas, que presentan un tamaño microscópico y entrelazados en forma de tubo. Muestran una forma densa y ramificada ya que, al alimentarse de materia orgánica muerta, necesitan maximizar su superficie de contacto con el entorno. Poseen gran resistencia mecánica e hidrofobicidad, atribuida a la estructura que circunda la membrana plasmática y pared celular [24].

Más allá de sus características físicas, estos materiales se reconocen como recurso sostenible, cuya fabricación no requiere altas demandas de energía. Se basan en el crecimiento de

seres vivos sobre un sustrato de materia orgánica, el mismo que funciona como fuente de nutrientes y de partículas de refuerzo; siendo los sustratos lignocelulósicos los que más aportan en su crecimiento.

En trabajos realizados previamente, se han sintetizado biomateriales a partir de las especies de hongos *Trametes sanguinea* y *Trametes flavida*, las cuales, en combinación con cascarilla de arroz, han formado biocompuestos con gran potencial industrial. Las muestras presentan rapidez de crecimiento, resistencia mecánica y un módulo de elasticidad similar a las espumas poliméricas convencionales [25].

1.4.2.2. Residuos agroindustriales. Para formar un material biofabricado a partir de hongos, se suelen usar desechos agrícolas para otorgarles nutrientes al micelio que propicien su crecimiento; además de convertirse en material de refuerzo para el compuesto [26].

La incorporación de sustratos en la composición de los materiales biofabricados es variada; subproductos como cascarilla de arroz, residuos de cacao, bagazo de agave, etc., ya han sido utilizados para crear diferentes biocompuestos que, según el tipo de hongo y sustrato específico, podrían conformar materiales más resistentes o flexibles [27].

Además, las propiedades específicas del biomaterial dependerán del proceso de manufactura asociado al diseño de estos materiales. Deben tomarse en cuenta parámetros de crecimiento, necesidades nutricionales y características genéticas del hongo a utilizar. Adicionalmente, hay que considerar tamaños de partícula óptimos en el sustrato, entre 1,00 – 1,50 cm de largo, ya que cuando las partículas son muy pequeñas, se inhibe el crecimiento de hifas entre las partículas del sustrato por la falta de oxígeno necesario para la respiración del hongo [28].

1.4.3. Características del biomaterial

En el presente caso, los biocompuestos a partir de micelio pueden clasificarse en productos ya sea con forma de sándwich (MBSC -mycelium-based sandwich composite-) o como espumas (MBF -mycelium-based foam-) [7]. Las características de ambos tipos de productos dependen

fuertemente de diversas variables de los procesos de síntesis y fabricación como temperatura y humedad.

La humedad afecta a las propiedades mecánicas y térmicas del producto final hecho con biocompuesto, aunque no existe un valor específico para el porcentaje de humedad residual óptimo antes de la inoculación del hongo. Los valores pueden rondar 10-15% hasta 40% en función de las especies de hongos estudiadas. El control de la humedad residual en el biocompuesto influye en la durabilidad, en la conductividad térmica y en la resistencia a la compresión del producto final [29].

La temperatura afecta de forma variable tanto a la tasa de crecimiento del micelio en el sustrato como al tiempo de germinación. Un estudio acerca de los efectos de la temperatura en el desarrollo de la cepa *P. Ostreatus*, analizó su crecimiento en rangos de temperatura de 15-30°C. Mientras la temperatura aumentaba, la tasa de crecimiento inicialmente ascendió y el tiempo para colonizar el sustrato disminuyó. No obstante, alcanzados valores cercanos a 25°C, las características mencionadas cambiaron su comportamiento, perjudicando al vigor y a la eficiencia biológica del hongo [30]. Esto último influye en el nivel de aislamiento acústico que el biocompuesto puede alcanzar pues, los acabados superficiales obtenidos resultaron en absorciones de sonido del 70-75% a una frecuencia de 1000 Hz [31].

1.4.4. Aplicabilidad en la arquitectura de interiores

Los biocompuestos a partir de micelio disponen de un excelente rendimiento como bloques de construcción o paneles para el aislamiento térmico y acústico de diversos espacios. “The Growing Pavilion” es un ejemplo de dichos espacios y está ubicado en Eindhoven, Holanda desde 2019. Se trata de una obra de diseño arquitectónico que demuestra la funcionalidad de materiales y procesos de manufactura biológica, para evaluar el desempeño al exterior de paneles compuestos de micelio de *Ganoderma* [32]. Dado que la mayoría de cepas de hongos se deterioran por la exposición a condiciones climáticas externas, se aplicaron recubrimientos orgánicos sobre los paneles de micelio para incrementar su resistencia a la intemperie y prolongar su vida útil [33].

“MycoTree” es otro caso de componentes orgánicos utilizados en la elaboración de una escultura para interiores, específicamente, usando al micelio como soporte estructural con conexiones metálicas para incrementar su rigidez [33]. Pese a que el material fúngico no es el óptimo para el soporte de cargas estructurales, el diseño ingenieril propuesto por Lee [34] a partir de estática tridimensional, permitió la aplicación de cargas de compresión sobre las secciones que incluyeran este biomaterial.

En torno a las normativas utilizadas, las fuentes consultadas no consideran un listado referencial de ensayos para evaluar propiedades mecánicas, térmicas o acústicas. Jones et al. [35] propusieron la ejecución de pruebas de resistencia a la flama según la norma ISO 5660, para analizar la correlación entre la incineración en una habitación y la tasa de calor liberado en especímenes de biocompuesto, con medidas 100x100x20 [mm], dispuestos en un calorímetro de cono de tres celdas. Pelletier et al. [31] aplicaron la norma ISO 10534-1 para determinar el coeficiente de absorción del sonido mediante mediciones de los niveles de presión sonora en un tubo de impedancia. Para obtener una medida directa, se realizaron ajustes que no contemplaba la norma desde un inicio. Finalmente, para cuantificar la resistencia a la compresión y a la flexión de probetas hechas con biocompuesto de micelio en varios sustratos orgánicos, Bagheriehnaajjar et al. [36] utilizaron las normas ASTM D2166, ASTM D3501 en las pruebas de compresión uniaxial y ASTM D1635 en una prueba de doblado de 3 puntos.

CAPÍTULO 2

2. Metodología

En este capítulo, se aborda la metodología aplicada para la elaboración de diferentes formas geométricas generadas con el biocompuesto a partir de una cepa específica de hongos. Además, se evalúan criterios de índole técnica y estética para la selección de las alternativas más adecuadas según el diseño arquitectónico, con el fin de revestir o decorar estructuras ya existentes como paredes. Asimismo, se detalla el proceso de síntesis del biocompuesto y los ensayos ejecutados para analizar el desempeño del material con la medición de propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Por último, se propone una validación técnica de los productos finales con el biomaterial respecto a productos ya existentes en el mercado.

2.1. Selección de geometría final del producto

En la presente sección, se definen los criterios y los diferentes prototipos que se elaborarán con la finalidad de escoger la opción óptima para la aplicación final considerada.

2.1.1. Criterios de evaluación

Los criterios de diseño descritos en la tabla 2.1 representan los requerimientos técnicos y estéticos que se evaluaron de las alternativas de diseño elaboradas a partir del biomaterial.

Tabla 2.1

Criterios de diseño y su propósito en la evaluación de alternativas

Criterio	Análisis de diseño
Facilidad de conformación	Se evaluó el tiempo, los materiales necesarios y la complejidad del moldeo para producir la geometría deseada.
Resistencia a la compresión y flexión	Se refiere a la capacidad que tenga el prototipo para soportar cargas estructurales y resistencia a la flexión.
Nivel higroscópico	Identificar la geometría con la mayor resistencia a la absorción de la humedad.
Atenuación del ruido	Determinar la geometría con el mayor coeficiente de absorción de sonido.
Flamabilidad	Comparar la velocidad y el tiempo de combustión con las espumas poliméricas convencionales.
Estética	Realización de panel sensorial para evaluar aspectos como uniformidad, color y aspecto
Precio	Se consideran los costos relacionados al material, fabricación y acabado final.

Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Facilidad de conformación	Resistencia a la compresión y flexión	Nivel higroscópico	Atenuación del ruido	Flamabilidad	Estética	Precio	$\sum_{i=1}^n$	Ponderación
Facilidad de conformación		0	0	0	0	1	0.5	2.5	0.089
Resistencia a la compresión y flexión	1		0.5	0	0	1	0	3.5	0.125
Nivel higroscópico	1	0.5		0	0	1	0	3.5	0.125
Atenuación del ruido	1	1	1		0.5	1	1	7	0.232
Flamabilidad	1	1	1	0.5		1	1	7	0.232
Estética	0	0	0	0	0		0	1	0.036
Precio	0.5	1	1	0	0	1		4.5	0.161
							Suma	28	1

2.1.2. Alternativas de diseño

En esta sección, se presentan las alternativas de diseño de productos a base del biocompuesto y una breve descripción sobre ellas:

- a) Panel tipo sánduche: consiste en colocar un núcleo de biocompuesto a base de micelio entre dos láminas de acero galvanizado. En la figura 2.1, se muestra una plancha similar con espuma de poliuretano como núcleo. Las dimensiones de la plancha de referencia son 2000 mm de largo, 300 mm de ancho y 38 mm de espesor (2.000x300x38) [37]. A diferencia de otras opciones, el uso de un conjunto de estos paneles tipo sánduche puede generar paredes completas de gran resistencia estructural. Además, los paneles tipo sandwich son de fácil y rápida instalación, reduciendo costos asociados a mano de obra requerida para su montaje [37].

Figura 2.1

Fotografía de un panel tipo sánduche con núcleo de Poliuretano de referencia hecho por empresa metalmecánica. [41].



- b) Panel hexagonal de biocompuesto: se crea una estructura con geometría hexagonal a partir del biocompuesto sin ningún recubrimiento para la implementación del material en paneles decorativos como proponen Sarmiento y González [38], [39]. Esta alternativa, en contraste con el panel tipo sánduche, es planteada como un revestimiento interior para montarse sobre superficies ya construidas como paredes. Por ende, no se buscan resistencias a la compresión o a la flexión elevadas. Mas bien, se pretende que estos paneles posean fácil adhesión entre sí y que, gracias a su forma geométrica, puedan ser implementados como parte de un diseño modular. Esto último facilita la repetición del patrón hexagonal y, también, es la alternativa más atractiva por su

semejanza con la forma de paneles de abeja como se muestra en la figura 2.2 [39] y [40].

Figura 2.2

Apariencia del panel decorativo planteado por Humanante y Estrella [40]



- c) Ladrillo de biocompuesto: son similares a los ladrillos convencionales de construcción, pero con la innovación de estar enteramente hechos de biocompuesto. Como referencia para las medidas, se utilizará la norma IS 1077 la cual indica que, para ladrillos no modulares hechos de arcilla, las dimensiones establecidas son 230x110x70 mm [41]. Esta geometría es de particular interés debido a que pueden ubicarse estratégicamente en unidades de construcción como paredes, uniéndose con el uso de un mortero o mezcla de concreto como en la figura 2.3.

Figura 2.3

Colocación de biocompuesto en moldes y secado [15]



2.2. Manufactura del biocompuesto

En esta sección se describe el procedimiento de elaboración del biocompuesto, así como las pruebas realizadas para evaluar el rendimiento del material mediante la medición de sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas.

2.2.1. Hongos

Dentro del campus Gustavo Galindo Velasco de ESPOL, se recolectaron 18 cepas de hongos, las cuales fueron posteriormente rotuladas con una codificación de una letra en

mayúsculas seguida de un número para identificarlas. La tabla 2.3 muestra el código de dos de las muestras más relevantes por contar con las mejores condiciones de entre todas las cepas como rápido crecimiento, aspecto, etc. Los datos proporcionados en la tabla 2.3 muestran a la respectiva especie a la que pertenece y el sustrato en el que se la encontró desarrollada según la metodología empleada por Coronel y Ruíz [42]. Los hongos recolectados, al poder extraerse del entorno natural, cuentan con una letra E en su codificación.

Tabla 2.3

Identificación de las cepas de hongos recolectadas [42]

Código de muestra	Especie	Medio de crecimiento
E5	Trametes sanguínea	Banco de madera
E17	Trametes flavida	Rama caída

Además de contar con mejor apariencia, las cepas E5 y E17 destacaron por alcanzar una mayor resistencia a la compresión que el resto de especies, lo cual es vital para el apilamiento de empaques, pero puede aprovecharse también para la elaboración de cubiertas, como reportaron Sarmiento y González [38]. Al haberse registrado resultados más favorables que las espumas poliméricas para el biomaterial en el trabajo de Sarmiento y González, se plantea continuar con la caracterización de los biocompuestos, especialmente con la cepa E5 por contar con un tinte orgánico, para validar su aplicabilidad en el diseño de interiores.

Las muestras recolectadas fueron recortadas y conservadas en bolsas plásticas herméticas para, posteriormente, ser sumergidas en hipoclorito de sodio (NaClO) al 5% durante 5 minutos. Luego, tras retirarse el NaClO, se rociaron las muestras con etanol al 70%. Después, se ubicó al hongo en hojas de papel absorbente estériles, las cuales facilitaron la remoción del exceso de humedad. Ya con los hongos limpios y secos, apoyándose de un bisturí estéril, se cortaron fragmentos del cuerpo fructífero con dimensiones de 1 a 5 mm. Tras ello, se procedió a sembrar de 4 a 6 fragmentos en una placa Petri con 20 ml de PDA (Agar Dextrosa de Papa). Consecuentemente, las placas fueron colocadas en una incubadora a una temperatura de 28 °C por

24 horas en ausencia de luz. Transcurrido dicho lapso de tiempo, de no suscitarse alteraciones en la coloración o el desarrollo de microorganismos indeseados sobre las muestras, las placas permanecieron durante 6 días adicionales bajo las mismas condiciones.

2.2.2. *Sustratos y su preparación*

El sustrato utilizado fue la cascarilla de arroz, particularmente, la cascarilla gruesa (CG), la cual es presentada en la tabla 2.4 con sus respectivos rangos de tamaño de partícula. La cascarilla gruesa fue sumergida en agua durante 24 horas para, después, ser exprimida con el fin de retirar excedentes de agua. Este sustrato fue almacenado en bolsas de polipropileno (PP) de 50x30 cm para continuar con su esterilización en una autoclave vertical con condiciones de 120°C por 20 minutos.

Tabla 2.4

Tamaños de partícula de la cascarilla de arroz empleada [38]

Codificación	Descripción de sustrato	Dimensiones de partícula (mm)
CF	Cascarilla fina	0,3 – 1,2
CG	Cascarilla gruesa	1,2 – 2,4

2.2.3. *Elaboración de muestras para pruebas físicas, mecánicas y térmicas*

Los moldes fueron generados considerando tres geometrías diferentes para la elaboración de productos finales como paneles y ladrillos de biocompuesto. Estos diseños permitieron analizar las variaciones en las propiedades térmicas y físicas del biocompuesto en distintas configuraciones. Adicionalmente, para evaluar las propiedades mecánicas, se elaboraron 9 réplicas con geometría cuadrangular (50x50x25 mm) y 9 réplicas con geometría rectangular (100x13x4 mm) en moldes de aluminio previamente diseñados y evaluados por investigaciones realizadas en CIBE ESPOL (Figura 2.4) [38] y [40]. Se tratan de 9 réplicas de biocompuesto a crearse en total: 3 permitirán analizar al biocompuesto desempeñándose por sí solo, 3 de biocompuesto con concreto adherido superficialmente en un extremo y 3 serán usadas con las planchas de acero galvanizado situadas a los extremos de cada probeta.

Figura 2.4

Moldes para cuadrados y prismas de biocompuesto



En el caso de la producción de ladrillos de biocompuesto, se consideró la norma IS 1077 [41], ajustándola para elaborar 5 muestras del biocompuesto con dimensiones 200x80x120 mm, que encajan dentro del marco de tolerancias indicado por la normativa. Adicionalmente, los bloques contarán con dos orificios rectangulares con medidas de la sección transversal de 60x40 mm y una profundidad de 80 mm. Dichas medidas fueron consideradas en la fabricación del molde hecho con madera de laurel negro como es presentado en la figura 2.5.

Figura 2.5

Moldes para ladrillos de biocompuesto con su ancho, largo y alto



En cuanto a los paneles tipo sánduche, se tomó en cuenta la ficha técnica de diversos productos utilizados para aislamiento termoacústico a nivel nacional para la construcción de 5 prototipos a escala de las planchas [37]. Las dimensiones para los moldes de estos prototipos fueron de 200x80x40 mm con el fin de guardar semejanza con las medidas de los moldes de los ladrillos. Asimismo, se utilizó madera de laurel negro como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6

Molde para prototipos con paneles tipo sándwich de biocompuesto

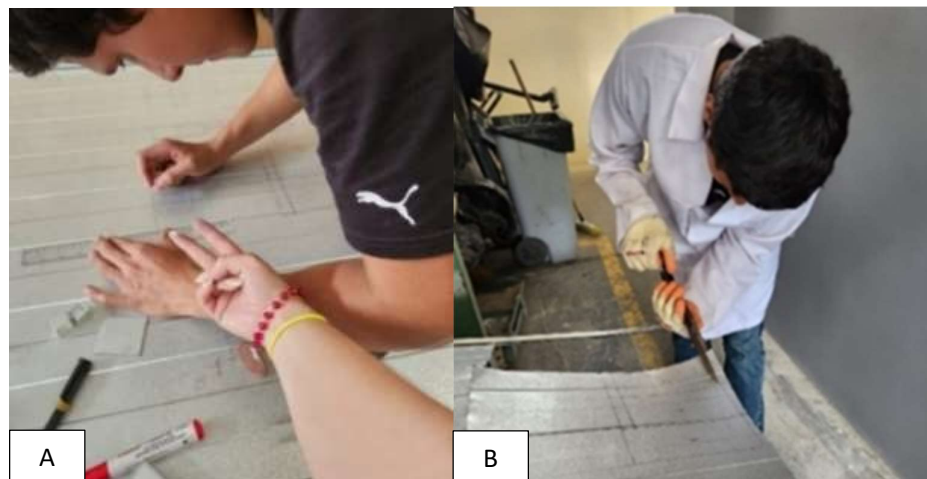


La figura 2.7 a) presenta los dibujos encima de una plancha de acero galvanizado de las 11 piezas a recortarse (3 para probetas cuadrangulares, 3 para rectangulares y 5 para los prototipos del panel tipo sánduche). A partir de esta lámina con medidas 1.000x300x0,5 mm, proporcionada por una empresa de metalmecánica, se obtuvieron los fragmentos de metal que recubrirán cada prototipo tanto superior como inferiormente. Una vez realizados los trazos, se recortaron con ayuda de una tijera corta lata como se indica en la figura 2.7 b).

Finalizado el proceso de moldaje y generados los cuerpos de biocompuesto, se procedieron a adherir los fragmentos de acero galvanizado en ambos extremos del biomaterial con el uso de un pegamento epóxico comercial.

Figura 2.7 (A y B)

A) Trazado de fragmentos sobre lámina de acero galvanizado y B) recorte de fragmentos en lámina de acero galvanizado



En el caso de los paneles hexagonales de biocompuesto, se usaron los moldes generados en la investigación de Humanante y Estrella como aparece en la figura 2.8 [39]. La figura 2.9 muestra dos tamaños para las piezas, de los cuales, se eligió el molde que permita generar los paneles con medidas de 300x260x36 mm.

Figura 2.8

Moldes termoformados de paneles hexagonales con relieves



Figura 2.9

Dimensiones de tamaños pequeño y mediano del panel decorativo planteado por Humanante y Estrella [39]

Dimensiones y Peso			
 Pequeño – P		 Mediano – M	
Ancho (mm)	300	Ancho (mm)	450
Alto (mm)	260	Alto (mm)	410
Espesor (mm)	36	Espesor (mm)	36
Peso (g)	149.71	Peso (g)	224.56

2.2.4. Siembra en fundas

El micelio desarrollado en las placas Petri preparadas en la sección 2.2.1 continuó su crecimiento en la cascarilla gruesa de arroz contenida en diversas fundas. Esto se hizo mediante la introducción aleatoria de pedazos cuadrados de las cepas con 5 mm de lado en las fundas plásticas. Las bolsas, llenas con el sustrato colonizado, fueron cerradas parcialmente y se ubicaron en los

moldes correspondientes a cada geometría del producto, permitiendo transpiración suficiente para el crecimiento del micelio en el sustrato en el período de incubación de 7 días a 28°C. Esto facilitó una mejor colonización en los moldes de los diversos productos y se verificó que el sustrato colonizado haya tomado la forma del molde.

Una vez adoptada la forma de los moldes, estos se removieron y los cuerpos generados se ubicaron dentro de bolsas con filtro de aire por 7 días adicionales. Con un completo desarrollo del micelio en el sustrato, se procedió a colocar las muestras en la estufa cerca de 16 horas a una temperatura de 80°C para inactivar el hongo. Posterior a este proceso, se realizaron las pruebas físicas, mecánicas y térmicas de los productos elaborados con el hongo inactivado.

2.3. Caracterización del biocompuesto

En esta sección, se especifican las condiciones y procedimientos bajo normativas de los ensayos que se realizaron para la evaluación de las propiedades para cada geometría de biocompuesto.

2.3.1. Pruebas físicas

Los ensayos físicos descritos se realizaron para relacionar la geometría diseñada del biocompuesto con sus propiedades.

2.3.1.1. Densidad y medición de humedad. Para determinar la densidad del biocompuesto, se calculó la relación masa/volumen, donde la masa correspondió al valor medido en gramos de la muestra en una balanza, mientras que el volumen resultó del producto de las tres medidas de los lados del paralelepípedo del biocompuesto. La absorción de agua de los biocompuestos fue medida bajo la norma BS 2972 “Methods of Test for Inorganic Thermal Insulating Materials”. Para efectuar el ensayo, se tomó una muestra de 12 gramos y se las llevó a secado en un horno a 60°C por 24 horas. El porcentaje de pérdida de humedad de los biocompuestos de micelio se obtiene como lo expresa la ecuación 2.1:

$$\text{Pérdida de humedad} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde P_i es el peso inicial, es decir, antes de ser inactivadas las muestras y P_f es el peso luego de ser inactivadas.

2.3.1.2. Ensayo acústico. El nivel de aislamiento acústico para cada una de las geometrías del biocompuesto se midió bajo los criterios de dos normas: la ISO 10140-2 “Medición en laboratorio del aislamiento acústico en elementos edificados” [43], y la Ch352.Of2000 “Aislación acústica en construcciones de uso habitacional” [44]. En ambas normativas se explica cómo deben establecerse dos salas, una sala de origen y otra de recepción, sobre las cuales se ubica el elemento de prueba. Para replicar la sala de origen a menor escala, se colocó un altavoz en una posición fija dentro de un espacio cerrado, mientras que en la sala de recepción se midió el nivel de presión sonora mediante un sonómetro, en una frecuencia estándar de 1.000 Hz. A partir de la diferencia de nivel de presión sonora entre la medición de una muestra de referencia y las probetas del biocompuesto, se procedió a calcular una estimación del sonido absorbido a través de la ecuación 2.2.

$$Sa = W_1 - W_2 \quad (2.2)$$

Donde Sa está expresado en decibeles, W_1 es la potencia sonora que incide sobre el elemento de prueba referencial, y W_2 es la potencia sonora que incide sobre el elemento de prueba de biocompuesto en diferentes configuraciones.

2.3.1.3. Estética. Para este apartado, se realizó un panel sensorial con 10 individuos, los cuales accedieron a evaluar los productos generados a partir del biocompuesto en términos de uniformidad y aspecto. Los atributos se pudieron calificar en una escala del 1 al 5, donde 1 alude a estructuras desiguales o deformes y 5 a estructuras uniformes. Por otro lado, el aspecto con una calificación de 1 implica una apariencia desagradable y 5 una apariencia agradable.

2.3.2. Pruebas mecánicas

Los ensayos mecánicos descritos a continuación corresponden a criterios importantes que deben considerarse para biomateriales que se aplicarán en la construcción.

2.3.2.1. Resistencia a la compresión. Para realizar el ensayo de compresión se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D3574 “Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials” [45]. Considerando la norma, se elaboraron 3 muestras en forma cuadrangular con dimensiones de 50x50x25 mm con una proporción 2:1 (ancho; altura) para cada uno de los prototipos del biocompuesto. Estas muestras fueron comprimidas a una velocidad de 50 mm/min y se determinaron tanto el módulo de elasticidad del material como el esfuerzo aplicado al 50% de su deformación.

Este ensayo tiene como objetivo la caracterización del comportamiento mecánico del material bajo esfuerzos de compresión. Las paredes y piso de una edificación son las áreas que normalmente se diseñan con sistemas de aislamiento térmico y acústico, y así mismo son zonas sometidas de forma constante a esfuerzos de compresión por lo que es crucial que el prototipo cumpla con los valores mínimos requeridos.

2.3.2.2. Resistencia a la flexión. La prueba de flexión en tres puntos se rigió bajo la norma ASTM D7264 “Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials” [46], para lo cual se fabricaron probetas rectangulares que de acuerdo con la norma presentaron un grosor de 4 mm, el ancho de las muestras fue de 13 mm y la longitud fue de 100 mm, que debe ser un 20% mayor que la longitud de soporte.

Para la flexión de 3 puntos, la punta de carga se colocó en el punto medio entre los dos soportes. En ensayo se ejecutó a una velocidad de movimiento de la mordaza de 1.0 mm/min.

2.3.3. *Propiedades térmicas y de inflamabilidad*

Para evaluar la capacidad que tienen las diferentes geometrías del biomaterial micelial para aislar eficientemente un espacio se realizaron los ensayos térmicos descritos a continuación. Además, la prueba de inflamabilidad permitió estudiar el comportamiento del biomaterial frente a la llama.

2.3.3.1. Temperaturas de degradación. Se utilizó la norma ASTM E1131 “Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry” [47], para evaluar la pérdida de masa

de cada geometría del biocompuesto. Se extrajo una masa micelial de aproximadamente 1 g del compuesto, se colocó en un crisol de alúmina y se calentó desde 25°C hasta 600°C a una velocidad de calentamiento de 30°C/min bajo atmósfera de nitrógeno (50ml/min) [35]. Antes de realizar el ensayo, cada muestra se inspeccionó con el microscopio óptico para eliminar cualquier impureza que estuviera unida a la muestra.

2.3.3.2. Velocidad y tiempo de combustión. La contribución potencial de un producto a un fuego no sólo depende de sus propiedades intrínsecas, sino también de su aplicación final en la construcción. Por esta razón, los prototipos deben ensayarse de manera que se simule su aplicación de uso final. En este caso, las características de inflamabilidad fueron evaluadas como lo establece la Norma ASTM D 635-03 “Standard Test Method for Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position” [48]. Las muestras utilizadas para este ensayo tenían dimensiones de 125 mm de largo por 13 mm de ancho, y un espesor de 3 mm. Cada muestra fue expuesta bajo una atmósfera controlada de 35°C y 75% de humedad relativa, a una llama azul de 20 mm de altura sin cambiar de posición [35]. Los parámetros de reacción al fuego medidos fueron el tiempo hasta la ignición (TTI), la pérdida de masa y la liberación total de humo (TSR).

2.3.4. Productos finales y su validación técnica

Como referencia para comparar las propiedades mecánicas de las probetas, se generaron muestras similares con la aplicación de spray de poliuretano expansivo comercial de 750 ml sobre los moldes cuadrangulares y rectangulares [49]. Para la comparación de propiedades físicas, térmicas y acústicas, se consideraron datos específicos, procedentes de fichas técnicas, reportados en la bibliografía sobre estructuras, principalmente paneles, conformadas por EPS, XPS y EPU [37].

CAPÍTULO 3

3. Resultados y análisis

La caracterización del biocompuesto proporcionó resultados referentes a sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas, los cuales facilitaron el estudio de su correlación. Además, se realizó un análisis económico de la elaboración de los productos del biomaterial para evaluar su viabilidad como aislantes termoacústicos de interiores.

3.1. Propiedades físicas

Se procedió con el análisis de propiedades físicas como la densidad, el comportamiento acústico y criterios estéticos de los tres prototipos elaborados a partir del biocompuesto.

3.1.1. *Análisis de densidad*

El valor de densidad del biocompuesto formado por micelio de hongo con sustrato de cascarilla de arroz gruesa es $8,51 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$. Este valor se calculó mediante la relación masa/volumen, en donde la masa promedio de 3 muestras del biocompuesto fue de 11,99 g, y el volumen promedio fue de $140,63 \text{ cm}^3$. Se determina que dicho valor es bajo por la poca compactación y la presencia de porosidades debido al elevado tamaño de partícula de la cascarilla [50]. En bibliografía consultada, se reporta que cuando la cascarilla de arroz pasa por un proceso de molienda para generar un sustrato fino que favorezca al desarrollo de estructuras menos porosas y más densas, la densidad promedio puede alcanzar un valor de $23,21 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ [50].

3.1.1.1. Pérdida de humedad y efectos en encogimiento. Se realizó el análisis de reducción dimensional y pérdida de humedad en muestras de biocompuesto, factores que representan criterios de procesamiento para controlar la calidad pues, menor encogimiento permite una mayor estabilidad dimensional [50].

Tras someter las muestras a un proceso de secado, se determinó una pérdida de humedad promedio de 16%. Este valor señala que menos de la cuarta parte de la masa inicial disminuyó luego del secado de 24 horas. Fuentes y Cantillana [51] reportaron que las muestras más densas, es decir, aquellas que se sintetizan con sustratos finos, presentan la mayor pérdida de humedad

(40%-50%) para biocompuestos con micelio de la misma cepa sintetizada en este trabajo. Respecto al encogimiento, se obtuvo un porcentaje de reducción de alrededor de 9 - 10% en los lados de los cuboides (7,5x7,5x2,5 a 7,3x7,2x2,42 cm). Existen fichas técnicas de espumas de poliuretano utilizadas para aplicaciones de aislamiento térmico que reportan valores inferiores al 10% como óptimos para cambios dimensionales [52], por lo que se indica que existe una buena estabilidad dimensional para las muestras.

3.1.2. Comportamiento acústico

La evaluación del aislamiento acústico se realizó en los tres tipos de productos y sobre una probeta de espuma de poliuretano como referencia. En la tabla 3.1 se muestran los niveles de presión sonora promedios (TAKM) en un intervalo de 60 s.

La transmisión directa del sonido al micrófono adaptado en el sonómetro permitió determinar un valor de referencia (80,9 dB) sobre el cual cuantificar el nivel de sonido absorbido en los demás casos. Así, la probeta de poliuretano registró la mayor cantidad de sonido absorbido (7,4 dB) por contar con numerosas porosidades de gran extensión por las que las ondas sonoras pueden propagarse. Al ingresar a los poros, las moléculas de aire procedentes del sonido generan vibraciones mecánicas que se convierten en calor de baja energía y permiten la propagación de las ondas en toda la muestra, como mecanismo de atenuación del sonido [53]. Por eso las espumas poliméricas se comportan como excelentes aislantes acústicos.

No obstante, las paredes generadas a partir de los 3 productos con biocompuesto también presentaron atenuaciones de sonido comparables. El biomaterial con recubrimiento de concreto fue el mejor de entre las 3 alternativas (5,2 dB) pues, la aportación de una capa adicional al biomaterial funcionó como barrera para impedir transmisión sonora [54]. Pelletier et al. demostraron una relación directa entre la rugosidad superficial y la absorción del sonido en paneles de biocompuesto, donde es favorable el uso de recubrimientos como concreto por sus numerosas irregularidades que facilitan la absorción del sonido [31]. Por otro lado, el biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado presentó la menor atenuación al ruido (4,7 dB). Pese

a servir como barrera para la transmisión del sonido, la superficie metálica es más prolija y dura que la del concreto. Además, los metales pueden conducir ondas mecánicas como las sonoras por el denso empaquetamiento atómico y el alto orden de sus estructuras cristalinas. Cuando las ondas sonoras colisionan con la superficie metálica, los átomos vibran e intentan preservar su ordenamiento a la vez que facilitan la propagación y transmisión del sonido [55].

Tabla 3.1

Resultados de pruebas acústicas en productos de biocompuesto y muestra patrón según norma Ch352.Of2000 [44]

Fuente de ruido	Número de repeticiones	Exposición al ruido	Frecuencia del sonómetro (Hz)	Tiempo de intervalo (s)	Promedio TAKM (dB)	Desviación estándar	Sonido atenuado (dB)
Generación de tonos a través de aplicación móvil	1	Directa o sin impedimento	1.000	60	80,9	0,3	-
	2		1.000	60			
	3		1.000	60			
	1	Impedimento poliuretano (PU)	1.000	60	73,5	1,4	7,4
	2		1.000	61			
	3		1.000	60			
	1	Impedimento biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	1.000	65	76,1	0,9	4,8
	2		1.000	61			
	3		1.000	60			
	1	Impedimento biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	1.000	66	76,2	0,1	4,7
	2		1.000	60			
	3		1.000	61			
	1	Impedimento biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	1.000	60	75,7	0,3	5,2
	2		1.000	61			
	3		1.000	60			

Respecto a la pared hecha únicamente de biocompuesto, se presentó una decente atenuación del ruido (4,8 dB), por el amortiguamiento de sus pequeños poros. Además, desde una

perspectiva macroscópica, dichas porosidades no eran tan profundas, implicando que no estaban conectadas en canales tan largos como las de espumas de PU o de XPS. Esto afectó significativamente a la absorción sonora de este producto.

3.1.3. *Análisis de Estética*

Los resultados del panel sensorial ejecutado se detallan en la tabla 3.2, donde se presentan los índices de aprobación de uniformidad, apariencia y olor de los productos. De 15 participantes, se registraron las calificaciones más altas tanto para el biocompuesto sin ningún recubrimiento que tiene forma de panel hexagonal como para el biocompuesto tipo sánduche con acero galvanizado, mientras que el biocompuesto con recubrimiento de concreto registró la puntuación más baja.

Como se indica en la escala, el biocompuesto tipo sánduche fue el producto con mayor porcentaje de aceptación. Este producto se mostró como el de mejor apariencia por contar, según los comentarios de los participantes, con un acabado más prolijo y por la llamativa combinación de colores entre plateado y naranja.

La escala muestra que el biocompuesto sin recubrimiento con forma hexagonal alcanzó las mayores calificaciones en uniformidad y olor pues, fue reconocido como la estructura más consistente y con el olor más suave entre todas las opciones. Esta aceptación en ambos criterios está asociada con la inutilización de otros tipos de materiales (metal o concreto). Por un lado, para la adherencia del acero galvanizado en los paneles tipo sánduche, se recurrió a un adhesivo epóxico trixotópico conformado por dos componentes: poliamida y resina epoxídica a base de Bisfenol-A [56]. La interacción de ambas sustancias generó un pegamento con olor irritante lo cual pudo afectar en su puntuación. Por otro lado, el concreto usado como recubrimiento superficial para los bloques poseía una alta fragilidad y pudo haber comprometido la percepción de los participantes en criterios de uniformidad y apariencia.

Tabla 3.2

Porcentaje y escala de aprobación de productos con criterios de análisis sensorial

Tipo de producto	Aceptación Uniformidad (%)	Aceptación Apariencia (%)	Aceptación Olor (%)	Aceptación como futura compra (%)	Promedio (%)
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	40	60	40	40	45
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	53,3	33,3	46,7	40	43,325
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	6,7	6,7	13,3	20	11,675

3.2. Propiedades mecánicas

Los requerimientos mecánicos fueron evaluados para los 3 tipos de configuración del biomaterial en sus respectivas condiciones de trabajo. Se compararon los resultados obtenidos con muestras de espumas poliméricas comerciales y con muestras sintetizadas con otros sustratos.

3.2.1. Resistencia a la compresión

En la tabla 3.3 se observan los resultados de resistencia a la compresión de los diferentes prototipos del biocompuesto definidos a un 50% de deformación según la norma ASTM D 3574. Se utilizó cascarilla de arroz gruesa para sintetizar el biocompuesto, requiriéndose aplicar esfuerzos entre 0,082-0,158 MPa para alcanzar deformaciones en torno al 50% de deformación, mientras que el esfuerzo máximo se registró a 0,51 MPa cuando la probeta alcanzó un 62% de deformación. Al reforzarse con recubrimientos cerámicos o metálicos, el esfuerzo al 50% de deformación incrementa a 0,125 MPa y 0,234 MPa, respectivamente. Cabe recalcar que la muestra sin recubrimiento, tras deformarse, recuperó entre 65-75% de su espesor original. Por el contrario, las muestras con recubrimiento de concreto y galvanizado disminuyeron su espesor en un 50% permanentemente. Cabe recalcar que las limitaciones en el diseño de los prototipos desarrollados en este trabajo pudieron influir significativamente en los resultados de esfuerzos alcanzados por las diferentes muestras.

En un estudio realizado por Fuentes y Monereo [51] sobre biocompuestos de micelio en sustratos lignocelulósicos, se reportó un esfuerzo de compresión máximo de 1,1 MPa para una muestra con fibra orgánica de paja fina. Esto indica que el tipo, forma y tamaño de partícula de los sustratos influyen en la resiliencia del material [51]. Las muestras con sustratos finos requieren mayor carga para alcanzar el esfuerzo máximo (1,1-1,3 MPa), implicando mayor rigidez que muestras con sustratos gruesos. Esto se atribuye a que, al disminuir el tamaño de partícula del sustrato, este se compacta más y se reduce el flujo de oxígeno [57]. Las espumas poliméricas comerciales como el poliuretano presentan un valor de esfuerzo de compresión máximo de 0,60 MPa, mientras que los sintéticos de poliestireno y resina fenólica, 0,68 y 0,55 MPa, respectivamente [58].

Tabla 3.3

Resultados de ensayo de compresión

Muestra	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo (MPa) a 50% de deformación	Módulo elástico (MPa)
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	0,51	0,082	0,158
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	0,68	0,125	0,234
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0,81	0,234	0,410

3.2.2. Resistencia a la flexión

Los resultados de flexión de 3 puntos para los tres tipos de probetas del biocompuesto se muestran en la tabla 3.4. La muestra de cascarilla de arroz gruesa con micelio sin recubrimiento presentó un esfuerzo de flexión máximo de 0,06 MPa. En contraparte, al añadirse los recubrimientos de concreto y galvanizado, los valores de flexión aumentaron a 0,08 y 0,30 MPa, respectivamente. En investigaciones realizadas por Johnson y Sims [59] se reportaron esfuerzos

de flexión máxima para estructuras metálicas tipo sánduche de PU (0,72 MPa) y PS (1,08 MPa). Por otro lado, se registraron esfuerzos diferentes en espumas poliméricas sin recubrimiento como PS (0,7 MPa), PU (0,21 MPa) y resina fenólica (0,78 MPa).

A partir de los resultados de compresión y flexión, se nota como el comportamiento mecánico del biocompuesto no es competitivo con espumas poliméricas comerciales. Sin embargo, los resultados mecánicos no son cruciales para definir la viabilidad técnica del proyecto pues, el producto no estará expuesto a cargas estructurales importantes al implementarse como artículo de complemento para el recubrimiento de paredes en interiores.

Tabla 3.4

Resultados de ensayo de flexión

Muestra	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo (MPa) a 50% de deformación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	0,06	0,014
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	0,08	0,021
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0,30	0,106

3.3. Propiedades térmicas y de inflamabilidad

Se realizaron análisis de Termogravimetría y de comportamiento a la flama de cada uno de los prototipos fabricados con el biocompuesto.

3.3.1. Análisis de termogravimetría

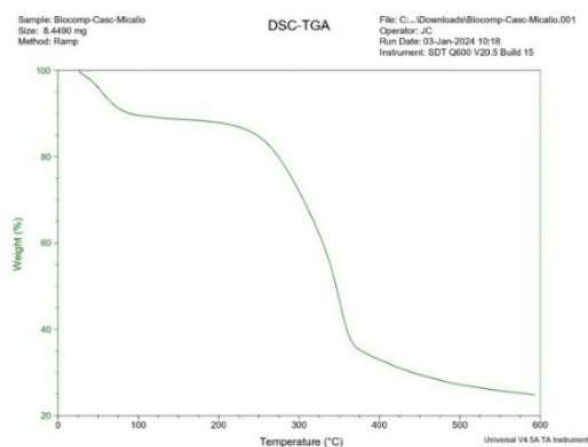
Se ejecutó un TGA (Análisis de Termogravimetría) a una muestra de biocompuesto de aproximadamente 1 g. Los resultados son presentados en la figura 3.1, y reflejaron una degradación compuesta por tres etapas. La primera etapa, desde 0°C hasta 123°C, mostró un 12% en pérdida de masa. Esto se debe a la evaporación del agua retenida tanto por la cascarilla como por el hongo y sirve como parámetro para estimar el contenido de humedad [35].

La segunda etapa mostró la descomposición del biocompuesto entre 250°C y 370°C con una pérdida de masa del 49%. La cascarilla de arroz contiene celulosa y lignina, componentes lignocelulósicos que empiezan a degradarse en ese rango de temperaturas. Además, durante la degradación del hongo que conforma al biocompuesto, ocurrieron reacciones que fragmentan aminoácidos o polisacáridos hasta convertirlos en agentes volátiles de menor peso molecular como lo destacaron Jones et al [35].

Por último, la tercera etapa mostró una masa residual de 27,5%, donde la muestra comenzó a carbonizarse desde 500°C. Los residuos contenidos en las fibras lignocelulósicas retardaron la finalización del proceso de degradación del biocompuesto hasta temperaturas superiores a 500°C. Este comportamiento lo volvió en un material competitivo ante espumas comerciales como el PS [60]. Según Bruscatto et al, la descomposición del EPS hasta 0% de su masa ocurrió rápidamente a temperaturas inferiores a 500°C, mientras que el biocompuesto, en esas temperaturas, conservó un 25% de su masa.

Figura 3.1

Curva de pérdida de masa TGA del biocompuesto según ASTM E1131 [47]



3.3.2. Comportamiento a la flama

Se determinó bajo la norma D635-03 el tiempo de combustión de los tres tipos de probetas del biocompuesto de micelio. Según la tabla 3.5, el tiempo hasta la ignición (TTI) de la probeta de biocompuesto sin recubrimiento fue de 7 segundos. Para el biocompuesto con recubrimiento de

concreto fue de más de 3.600 segundos y para el recubrimiento de galvanizado, 2.200 segundos. Existen notables diferencias en los tiempos de los últimos prototipos respecto al primero, atribuyéndose la causa al recubrimiento.

Al colocar los prototipos a la flama, el material superficial es afectado primero (concreto y acero). Conforme la temperatura incrementa, hay pérdida de resistencia tanto en el concreto (temperatura mayor a 400°C) como en el acero (temperatura mayor a 600°C). Estos rangos de temperatura son alcanzados tras 30 minutos de exposición al fuego [35].

En la figura 3.2, el biocompuesto, al estar en contacto con la llama, se autoextingue y se carboniza. Por tanto, el porcentaje de pérdida de masa y la liberación total de humo (TSR), medida por unidad de área superficial de la muestra, son valores leves. Los materiales con alta generación de carbón provocan menos humo debido a la capacidad del carbón para impedir la liberación de fragmentos micrométricos de fibra en la columna de humo [61]. La formación de carbón en el biocompuesto de micelio es atribuida a la presencia de compuestos aromáticos como la lignina en la cascarilla de arroz y el fósforo en el micelio. Además, el alto contenido de sílice presente en la cascarilla de arroz (15-20% en peso) contribuyó a alcanzar mejores propiedades de reacción al fuego [35].

En bibliografía se reportó el comportamiento al fuego de espumas como la de poliestireno extruido (XPS) [61]. A pesar de tener un TTI similar, el porcentaje de pérdida de masa y la TSR fueron significativamente mayores a los del biocompuesto, 60% y $1.146 \frac{m^2}{m^2}$, respectivamente. Esto se atribuye a que, durante la combustión del XPS, la espuma se consume a pequeñas partículas en lugar de carbonizarse. La degradación del poliestireno es producida mediante un proceso de cadena radical con la escisión de enlaces C-C, y la fragmentación de la estructura molecular en gases volátiles, generando cantidades ínfimas de carbón [61].

Tabla 3.5*Resultados del ensayo de inflamabilidad*

Tipo de material	TTI (s)	% pérdida de masa	TSR ($\frac{m^2}{m^2}$)
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	7	12	50
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	3.600	8	53
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	2.200	7	50

Figura 3.2 *Muestra del biocompuesto sin recubrimiento tras exposición a la llama*

3.4. Análisis económico

La fabricación de los productos propuestos a partir del biocompuesto considera tanto costos fijos como costos variables, desglosándose gastos por materia prima, suministros y fuerza laboral. Por un lado, los costos fijos (Tabla F.1) permiten cubrir los gastos requeridos mensualmente para la elaboración del biomaterial mientras que, los costos variables (Tabla F.2) brindan un costo de producción aproximado por cada unidad de bloque, panel hexagonal o panel tipo sánduche elaborada con el biomaterial. Ambos costos son descritos de forma general en la tabla 3.6.

Tabla 3.6

Costos fijos y variables de las alternativas de diseño elaboradas con biocompuesto

Rubros	Panel hexagonal	Bloque con concreto	Panel tipo sánduche
Costo variable unitario	\$0,54	\$0,66	\$12,85
Costos fijos mensuales		\$1.270,00	
Costos fijos anuales		\$15.240,00	

De acuerdo a la tabla 3.6, de los 3 productos mencionados, el panel hexagonal hecho de biocompuesto, es el producto menos costoso pues, no se requieren insumos adicionales como adhesivos o acero para su elaboración. Sumado a ello, este prototipo cumplió eficientemente con las pruebas de aislamiento acústico y flamabilidad, por lo cual se desarrolló el análisis económico y de inversión a base de este producto para evaluar si la decisión de comercializar paneles de biocompuesto tiene viabilidad financiera.

La producción en el punto de equilibrio es un parámetro crucial para determinar cuántos paneles se requieren fabricar para cubrir los costos del proceso. Para ello, se estimó un precio de venta al público, el cual, en referencia a empresas de venta de productos a base de micelio, se fijó en \$10,00 por unidad [62]. La tabla 3.7 indica que la producción debe superar los 134 paneles mensualmente para comenzar a percibir beneficios por la venta del producto. Asimismo, las tablas F.3 y F.4 reportaron los rubros asociados al punto de equilibrio para las otras dos alternativas de diseño.

Tabla 3.7

Rubros para producción en punto de equilibrio de paneles hexagonales

Detalle de los rubros	Valor
Costos fijos mensuales	\$1.270
Precio de venta BC	\$10,00
Costo variable unitario BC	\$0,54
Punto de equilibrio mensual	134
Punto de equilibrio anual	1611

Para cumplir con la demanda del punto de equilibrio, es necesario estimar el monto de inversión inicial para la adquisición de recursos tangibles y el pago de rubros intangibles como permisos de funcionamiento y registros de propiedad intelectual [63]. La información mencionada es presentada en la tabla F.5, detallándose un capital a invertir de \$3016,00.

Con el fin de evaluar la rentabilidad del proyecto a largo plazo, la tabla 3.8 muestra criterios de inversión aplicados para analizar su crecimiento tras 5 años. La deducción de dichos criterios fue realizada a partir de la tabla F.10, la cual refleja el flujo de caja desde el año inicial. En la tabla 3.8, la tasa interna de retorno (45%) superó considerablemente a la de descuento anual del 15%, utilizada para convertir los flujos de caja futuros a su valor en la actualidad [64]. Como consecuencia, el proyecto es viable financieramente y garantiza una alta rentabilidad frente a otras opciones de inversión.

Adicionalmente, el valor actual neto (VAN) es un criterio de inversión que permite estimar los cobros y pagos de un proyecto para llevarlos a tiempo presente y determinar cuánto se ganará o perderá con dicha inversión [64]. En el presente caso, el valor supera los \$3700,00, mostrados en la tabla 3.8, lo cual implica la obtención de un flujo de caja positivo con el paso del tiempo.

Tabla 3.8

Indicadores económicos y criterios para invertir en decisión

Tasa de descuento	15,00%
TIR	45,00%
VAN	\$3.704,42
PRI	2 años y 10 meses

Por último, se calculó el período de recuperación de la inversión (PRI) o el tiempo en el que, a partir de los flujos de efectivo generados por el proyecto, se cubriría en su totalidad los gastos de capital de la inversión inicial [64]. La tabla 3.8 refleja que el PRI es de 2 años 10 meses,

lo cual favorece al proyecto por la recuperación medianamente rápida de capital y minimiza el riesgo frente a otros proyectos a largo plazo.

3.5. Matriz de decisión final

En la tabla 3.9 se observan las ponderaciones finales otorgadas a cada prototipo propuesto del material biocompuesto según la evaluación de cada criterio.

Tabla 3.9

Matriz de decisión con las conclusiones respecto al producto final elegido

Conclusión	Facilidad de conformación	Resistencia a la compresión y flexión	Nivel higroscópico	Atenuación del ruido	Flamabilidad	Estética	Precio	$\sum f_{final}$
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC) / Panel hexagonal	0,5×0,089	0,17×0,125	0,33×0,125	0,42×0,232	0,17×0,232	0,5×0,036	0,5×0,161	0,3524
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC) / Bloque	0,17×0,089	0,33×0,125	0,17×0,125	0,42×0,232	0,5×0,232	0,17×0,036	0,33×0,161	0,3503
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0,33×0,089	0,5×0,125	0,5×0,125	0,17×0,232	0,33×0,232	0,33×0,036	0,17×0,161	0,3096

Los valores de los pesos específicos de cada criterio se obtuvieron en la tabla 2.2 del capítulo 2, mientras que las puntuaciones de cada prototipo del biocompuesto según el tipo de criterio evaluado se las asignó en las tablas A.1 a la A.7 de la sección de anexos.

Una vez evaluadas las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas en los tres prototipos del biomaterial de micelio, resultó como mejor alternativa el biocompuesto sin ningún recubrimiento (panel hexagonal), como se ve en la tabla 3.9. Este producto destacó sobre los otros dos modelos en las características de facilidad de conformación, aislamiento acústico, estética y precio, criterios importantes para la implementación del biomaterial en interiores.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Tras el estudio minucioso de diferentes criterios de diseño para la solución óptima, se detallan en las secciones a continuación los aspectos más relevantes del proyecto y sugerencias de mejora para futuros trabajos de investigación.

4.1. Conclusiones

- Al cabo de la producción de los prototipos de alternativas de diseño con biocompuesto y su caracterización, se reportaron valores de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión inferiores a los de los prototipos elaborados con espuma de poliuretano (EPU). Particularmente, el prototipo de biocompuesto sin materiales externos de refuerzo, registró los valores más bajos en ambas propiedades mecánicas, mientras que, los prototipos con recubrimientos (acero y concreto) tuvieron valores ligeramente superiores a los de la EPU. Esto se debe a la poca compactación del sustrato de cascarilla de arroz gruesa al biomaterial, ya que la cascarilla no se molió previamente y mostró poca uniformidad en el tamaño de partícula de la cascarilla. El uso de recubrimientos como el acero y el concreto, fue positivo en la mejora de las propiedades indicadas. Estas capas de refuerzo alteraron la distribución de esfuerzos a las que se sometieron las muestras.
- Por otra parte, los prototipos elaborados con biocompuesto registraron niveles de absorción de sonido comparables, pero levemente menores que los de una espuma de poliuretano. De entre las alternativas de diseño presentadas, el bloque con recubrimiento de concreto en los extremos mostró el mayor nivel de absorción de sonido, lo cual puede traducirse en un adecuado desempeño como aislante acústico. A pesar de que el panel tipo sánduche contaba con impedimentos para la transmisión sonora como los recubrimientos metálicos en sus extremos, este prototipo presentó los menores niveles de absorción de sonido. Esto se debe a que, a diferencia del concreto, el acero posee una estructura cristalina altamente

ordenada, repetitiva y un empaquetamiento atómico denso lo cual favorece la propagación de ondas mecánicas y, en el presente caso, ondas acústicas.

- A propósito de las propiedades térmicas y de flamabilidad del biomaterial, se evidenció una descomposición total a una temperatura mayor que la de la espuma de poliuretano. Esto se debió a la aportación de sílice procedente de la cascarilla de arroz que, junto a los residuos de las fibras lignocelulósicas, aumentaron la temperatura de la última fase de degradación del biocompuesto. Asimismo, el biocompuesto de micelio presentó, en sus diferentes prototipos, al menos un tiempo de ignición inicial frente a la llama de 7 segundos con un comportamiento de autoextinción al momento, en contraste con la espuma de poliuretano que se encendió en menos de 2 segundos y requiere de aditivos retardantes de llama. En ambos casos, la aplicación de recubrimientos externos (acero y concreto) fue positiva en el comportamiento a la flama de los productos y en la temperatura máxima para su degradación, ya que la inclusión de los recubrimientos externos aumentó el tiempo hasta la ignición inicial y la temperatura de degradación y, por consiguiente, el tiempo total de descomposición. Cabe acotar que, en todas las muestras se observó la carbonización del biocompuesto tras mostrar un comportamiento autoextinguible de su llama comparable al de otros estudios similares [61].
- En torno al análisis económico y de inversión, el desarrollo de un proyecto de generación de paneles hexagonales del biomaterial fue presentado como una opción de inversión altamente rentable. Esto se debe, en primer lugar, a los bajos costes de manufactura de este tipo de paneles decorativos y al precio de venta competitivo que se fijó a partir de un análisis de la producción requerida para alcanzar el punto de equilibrio. Este precio es inferior a productos similares hechos a base de espumas poliméricas comerciales, lo que asegura un crecimiento en ventas por parte del mercado objetivo. Adicionalmente, este proyecto mostró, partiendo de un monto de inversión inicial de más de \$3.000, un período de retorno de la inversión (PRI) de 2 años y 10 meses, asegurando una viabilidad a mediano

y largo plazo. Asimismo, métricas como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) respaldaron al PRI aseverando que la inversión inicial sería recuperada. De esta forma, la ejecución del presente proyecto minimiza los riesgos asociados con otras opciones de inversión.

4.2. Recomendaciones

- Para una evaluación más profunda de las aplicaciones potenciales del biomaterial, se recomienda realizar ensayos de conductividad y resistencia térmica en muestras elaboradas únicamente con el biocompuesto. El estudio de estas propiedades térmicas permitiría conocer la efectividad que puede tener el biocompuesto como aislante térmico en aplicaciones de diseño de interiores y contribuiría a un entendimiento más profundo de las características presentadas por este material como solución constructiva para confort térmico.
- Por otro lado, se podría estudiar el efecto de la variación de los espesores de muestras del biomaterial en resultados de ensayos físicos, acústicos y térmicos. Con este planteamiento, sería posible identificar un valor óptimo de espesor del biocompuesto con el cual, se registren los mejores resultados en cuanto a aislamiento termoacústico, estabilidad dimensional tras absorción de humedad, etc.
- Además, se sugiere realizar una ecoauditoría para analizar la distribución de la energía embebida o requerida entre las etapas del ciclo de vida útil de un producto hecho a base del biomaterial. Asimismo, se podrían determinar la huella de carbono, las demandas hídricas para dichas etapas y, consecuentemente, el proceso con mayor contribución a los aspectos anteriormente mencionados con la finalidad de proponer estrategias para minimizar el impacto ambiental de los productos derivados del biocompuesto.
- Se recomienda para futuros trabajos realizar muestras del biocompuesto de micelio con el sustrato de cascarilla de arroz sometido previamente por un proceso de molienda para reducir el tamaño de partícula, y determinar de qué forma una mayor compactación y

densidad del biomaterial influye sobre las propiedades de aislamiento acústico y de flamabilidad.

- Para evaluar de forma más exacta la propiedad de flamabilidad de los prototipos de biocompuesto, se recomienda realizar pruebas de reacción al fuego mediante la técnica del calorímetro de cono de tres celdas. La misma proporcionará resultados de tiempo de ignición (TTI), tasa de liberación de calor (HRR), tasa de pérdida de masa (MLR) y liberación de humo (CO , CO_2 y hollín), parámetros importantes para definir correctamente el comportamiento a la llama del biomaterial.

REFERENCIAS

- [1] K. Feijóo-Vivas, S. A. Bermúdez-Puga, Hernán-Rebolledo, J. M. Figueroa, P. Zamora, and L. Naranjo-Briceño, “Fungal mycelium-bioproducs development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy,” *Bionatura*, vol. 6, no. 1, pp. 1637–1652, 2021, doi: 10.21931/RB/2021.06.01.29.
- [2] C. Iván Riofrio Álvarez, E. Carolay Maribel Oviedo Navarrete, and E. Denisse Mariel Navarro Cedeño, “Importancia de productos biodegradables en Ecuador,” *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, ISSN-e 1696-8352, N°. 6, 2019 (Ejemplar dedicado a: Junio), no. 6, p. 75, 2019, Accessed: Oct. 28, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9003995&info=resumen&idioma=SPA>
- [3] N. Verma, S. E. Jujavarapu, and C. Mahapatra, “Green sustainable biocomposites: Substitute to plastics with innovative fungal mycelium based biomaterial,” *J Environ Chem Eng*, vol. 11, no. 5, p. 110396, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.JECE.2023.110396.
- [4] M. Sydor, G. Cofta, B. Doczekalska, and A. Bonenberg, “Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations,” *Materials*, vol. 15, no. 18. MDPI, Sep. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15186283.
- [5] M. C. Vega-Rodríguez and R. A. Hernández-Chaverri, “Trichoderma growth in pineapple stubble to obtain spores for agricultural use,” *Agronomia Mesoamericana*, vol. 31, no. 3, pp. 597–608, Dec. 2020, doi: 10.15517/AM.V31I3.40275.
- [6] N. Attias *et al.*, “Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis,” *J Clean Prod*, vol. 246, p. 119037, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.119037.
- [7] C. Girometta *et al.*, “Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/SU11010281.
- [8] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Gestión de Residuos Sólidos: Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales,” 2021. Accessed: Oct. 28, 2023. [Online]. Available: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentación%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20\(Rcv%20%20CGTPE\)%20\(Rcv.%20Dicos\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentación%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20(Rcv%20%20CGTPE)%20(Rcv.%20Dicos).pdf)
- [9] Ministerio de Agricultura y Ganadería, “Panorama Agroestadístico,” Aug. 2023. Accessed: Oct. 28, 2023. [Online]. Available: [sipa.agricultura.gob.ec.http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama_estadistico/panorama_estadistico.pdf](http://sipa.agricultura.gob.ec/http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama_estadistico/panorama_estadistico.pdf)
- [10] K. C. R, Y. A. M, A. M. M, R. O. V, and L. C. Ch, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,” *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, vol. 9, no. S1, pp. 122–132, May 2017, doi: 10.24188/RECIA.V9.NS.2017.530.
- [11] J. C. López Ayala, X. R. Cazorla Vinueza, G. O. Zambrano Cárdenas, and W. F. Chancusig Marcillo, “La economía circular de los desechos generados por la gramínea de arroz frente al efecto ambiental,” *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 6, N°. 3, 2021, págs. 874-900, vol. 6, no. 3, pp. 874–900, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i3.2411.

- [12] ASEPLAS, “INTEGRA,” *Estadísticas del Sector Plástico*, Guayaquil, pp. 34–35, Sep. 19, 2023.
- [13] J. I. Fernando López-Aguirre, J. I. Carlos Pomaquero-Yuquilema, and J. Luis López-Salazar III, “Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba,” *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 5, N°. 12, 2020 (Ejemplar dedicado a: Diciembre 2020), págs. 725-742, vol. 5, no. 12, pp. 725–742, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i12.2139.
- [14] M. Fernanda and S. Torres, “Ecología política y geografía crítica de la basura en el Ecuador,” *Letras Verdes: Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, ISSN-e 1390-6631, ISSN 1390-4280, N°. 17, 2015 (Ejemplar dedicado a: Letras Verdes 17), págs. 4-28, vol. 17, no. 17, pp. 4–28, 2015, doi: 10.17141/letrasverdes.17.2015.1259.
- [15] X. Zhang, J. Hu, X. Fan, and X. Yu, “Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials,” *J Clean Prod*, vol. 342, p. 130784, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.130784.
- [16] C. Maraveas, “Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes,” *Materials* 2020, Vol. 13, Page 262, vol. 13, no. 2, p. 262, Jan. 2020, doi: 10.3390/MA13020262.
- [17] S. Bhuvaneshwari, H. Hettiarachchi, and J. N. Meegoda, “Crop Residue Burning in India: Policy Challenges and Potential Solutions,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 5, Mar. 2019, doi: 10.3390/IJERPH16050832.
- [18] L. Yang, D. Park, and Z. Qin, “Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review,” *Front Mater*, vol. 8, p. 737377, Sep. 2021, doi: 10.3389/FMATS.2021.737377/BIBTEX.
- [19] A. Livne, H. A. B. Wösten, D. Pearlmutter, and E. Gal, “Fungal Mycelium Bio-Composite Acts as a CO₂-Sink Building Material with Low Embodied Energy,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 10, no. 37, pp. 12099–12106, Sep. 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c01314.
- [20] B. Harris, “ENGINEERING COMPOSITE MATERIALS.”
- [21] G. Schmalz and K. M. Galler, “Biocompatibility of biomaterials – Lessons learned and considerations for the design of novel materials,” *Dental Materials*, vol. 33, no. 4. Elsevier Inc., pp. 382–393, Apr. 01, 2017. doi: 10.1016/j.dental.2017.01.011.
- [22] M. A. Shakir, B. Azahari, Y. Yusup, M. Firdaus Yhaya, A. Salehabadi, and M. I. Ahmad, “Preparation and Characterization of Mycelium as a Bio-Matrix in Fabrication of Bio-Composite,” *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage*, vol. 65, pp. 253–263, 2020, [Online]. Available: www.akademiabaru.com/arfmts.html
- [23] A. B. Piña-Guzmán, D. A. Nieto-Monteros, and F. Robles-Martínez, “Utilization of agricultural and agroindustrial residues in the cultivation and production of edible mushrooms (*Pleurotus* spp.),” *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 32, no. EspecialResiduosSolidos, pp. 141–151, 2016, doi: 10.20937/RICA.2016.32.05.10.
- [24] M. Rubio-Godoy, V. Bandala Muñoz, M. Favila Castillo, A. Risquez Valdepeña, and R. Baza Román, *Técnicas de aislamiento, cultivo y conservación de cepas de hongos en el laboratorio*, 1st ed., vol. 1. Xalapa: Instituto de Ecología A.C., 2021.

- [25] E. X. López Dalmazzo, “Producción de hongos ostra usando como sustrato residuos de corteza de eucalipto ricos en lignina producidos por la empresa NOVOPAN,” *ESPE*, Aug. 2020.
- [26] G. Ortiz and L. Ruben, “Evaluación de tres materiales como sustrato y dos materiales como tierra de cobertura para el cultivo del champiñón (*Agaricus bisporus* (Lange) sing.)”
- [27] S. Castro, A. Aldrete, J. López, and V. Ordaz, “Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino,” *Maderas y bosques*, vol. 25, no. 2, 2020.
- [28] N. Rodríguez, M. Araque, and F. Perdomo, “PREPARACIÓN DE SUSTRATOS PARA HONGOS COMESTIBLES Y MEDICINALES,” 2006.
- [29] J. W. Deacon and J. W. Deacon, “Fungal biology,” p. 371, 2006, Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Fungal+Biology%2C+4th+Edition-p-9781405130660>
- [30] Y. Hu *et al.*, “Effects and Mechanism of the Mycelial Culture Temperature on the Growth and Development of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm,” *Horticulturae* 2023, Vol. 9, Page 95, vol. 9, no. 1, p. 95, Jan. 2023, doi: 10.3390/HORTICULTURAE9010095.
- [31] M. G. Pelletier, G. A. Holt, J. D. Wanjura, E. Bayer, and G. McIntyre, “An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates,” *Ind Crops Prod*, vol. 51, pp. 480–485, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.09.008.
- [32] I. Conde Santiago, “Biocompuestos de Micelio y sus posibles aplicaciones en la arquitectura,” 2021, Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50464>
- [33] D. Almpiani-Lekka, S. Pfeiffer, C. Schmidts, and S. il Seo, “A review on architecture with fungal biomaterials: the desired and the feasible,” *Fungal Biol Biotechnol*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, Dec. 2021, doi: 10.1186/S40694-021-00124-5/FIGURES/8.
- [34] J. Lee, “Computational Design Framework for 3D Statics,” PhD Dissertation, ETH Zurich, Zurich, 2018. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://block.arch.ethz.ch/brg/files/juney_lee_phd_sm1_1565216393.pdf](https://block.arch.ethz.ch/brg/files/juney_lee_phd_sm1_1565216393.pdf)
- [35] M. Jones *et al.*, “Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium - Biomass Composite Materials,” *Scientific Reports* 2018 8:1, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-36032-9.
- [36] G. Bagheriehnajjar, H. Yousefpour, and M. Rahimnejad, “Multi-objective optimization of mycelium-based bio-composites based on mechanical and environmental considerations,” *Constr Build Mater*, vol. 407, p. 133346, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133346.
- [37] KUBIEC S.A., “Kutermico: Paneles de acero tipo sánduche con aislamiento termoacústico,” Quito. Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://kubiec.com/kutermico/>
- [38] A. S. Sarmiento Proaño, E. J. González Benites, and ESPOL, “Aprovechamiento del micelio fúngico del hongo *Pycnoporus sanguineus* para la generación de paneles acústicos mediante técnicas de micotectura,” ESPOL, Guayaquil, 2023. Accessed: Oct. 24, 2023. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58387>

- [39] G. Humanante and A. Estrella, "Diseño de paneles decorativos aplicando micomateriales," ESPOL, Guayaquil, 2022. Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57759>
- [40] S. N. SERTKAYA, "ASSESSMENT OF MYCELIUM COMPOSITE BUILDING ELEMENTS PRODUCED VIA BIODESIGN," Dokuz Eylül University, Esmirna, 2022. Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://avesis.deu.edu.tr/dosya?id=e5f3bab1-c260-4413-a78f-121439a9f2ad>
- [41] Bureau of Indian Standards, "IS1077-1992: Common Burnt Clay Building Bricks-Specification," New Delhi, 2007.
- [42] D. Coronel and L. Ruíz, "Aprovechamiento del micelio de hongos nativos de la ESPOL con fines de micotectura," ESPOL, Guayaquil, 2022.
- [43] ISO - International Organization for Standardization, "ISO 10140-2: Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of building elements-Part 2: Measurement of airborne sound insulation," 2021. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/75ffc25b-c841-4f95-a6b3->
- [44] Instituto de la Construcción de Chile, "NCh352.Of2000 Aislación acústica-Parte 1: Construcciones de uso habitacional-Requisitos mínimos y ensayos (extracto) 1. INTRODUCCION," 2021.
- [45] ASTM International, "ASTM D3574-03: Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams," 2003.
- [46] ASTM International, "ASTM D 7264/D 7264M-07 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1," 2007. [Online]. Available: <http://www.ansi.org>.
- [47] ASTM international, "ASTM E1131-08: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry 1," 2010. [Online]. Available: www.astm.org,
- [48] ASTM International, "ASTM D 635-03: Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position".
- [49] Sika, "HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO SIKA BOOM," Durán, Sep. 2018. [Online]. Available: <http://ecu.sika.com>
- [50] H. Mbabali, M. Lubwama, V. A. Yiga, E. Were, and H. Kasedde, "Development of Rice Husk and Sawdust Mycelium-Based Bio-composites: Optimization of Mechanical, Physical and Thermal Properties," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 2023, doi: 10.1007/s40033-023-00458-x.
- [51] Fuentes Ignacio and Monereo Cantillana, "Bio fabricación. Micelio como material de construcción: biocomposite en sustratos lignocelulósicos," *Universidad Politécnica de Madrid*, 2020.
- [52] Construmática, "Condiciones Técnicas del Poliuretano Rígido como Aislamiento en Construcción: Planchas de Poliuretano (PUR/PIR) para Aislamiento Térmico en la Edificación."
- [53] J. Arenas and M. Crocker, "Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials," *Sound and Vibration*, 2010.

- [54] A. Butu, S. Rodino, B. Miu, and M. Butu, “MYCELIUM-BASED MATERIALS FOR THE ECODESIGN OF BIOECONOMY,” *Dig J Nanomater Biostruct*, vol. 15, no. 4, pp. 1129–1140, 2020, doi: 10.15251/DJNB.2020.154.1129.
- [55] W. D. Callister Jr. and D. R. Rethwisch, “Callister’s Materials Science and Engineering, 10th Edition, Global Edition,” pp. 307–323, 2019, Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-be/Callister%27s+Materials+Science+and+Engineering%2C+Global+Edition%2C+10th+Edition-p-9781119455202>
- [56] Pegatanke del Ecuador, “Ficha de datos de seguridad Pegatanke Acero Compuestos 1 y 2,” Manta, 2018.
- [57] L. Jiang, D. Walczyk, G. McIntyre, R. Bucinell, and G. Tudryn, “Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms,” *J Manuf Process*, vol. 28, pp. 50–59, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.029.
- [58] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz, and K. Chandrashekhara, “Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures,” *Compos Struct*, vol. 123, pp. 169–179, May 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.12.042.
- [59] A. F. Johnson and G. D. Sims, “Mechanical properties and design of sandwich materials,” 1986.
- [60] C. Bruscatto, E. Malvessi, R. N. Brandalise, and M. Camassola, “High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust — Sustainable technology for waste reduction,” *J Clean Prod*, vol. 234, pp. 225–232, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.150.
- [61] M. P. Jones *et al.*, “Thermal degradation and fire reaction properties of mycelium composites,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319065199>
- [62] M. Moreno, “En Bio Fabrik se aprovecha el aserrín; iniciativa ambiental de Guayaquil es una de las cinco finalistas de Ecuador en Premios Latinoamérica Verde,” *El Universo*, Guayaquil, Jun. 23, 2021.
- [63] Servicio Nacional de Derechos Intelectuales, “RESOLUCIÓN No. 002-2019-DG-NT-SENADI,” Guayaquil, 2019.
- [64] S. M. Toro, J. E. Ledezma, and J. W. Escobar, “Modelo de evaluación de proyectos de inversión en condiciones de riesgo para apertura de programas de pregrado en instituciones de educación superior de Colombia: caso de estudio,” *Ingeniería Industrial*, vol., no. 33, pp. 99–132, 2015, Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337443854005>

APÉNDICES

Apéndice A. Matrices de decisión

Las tablas A.1 a la A.8 que se muestran a continuación, contienen la asignación de pesos entre la comparación de cada prototipo con respecto a otro prototipo del biomaterial de micelio, para cada criterio de evaluación. Estas tablas se emplean para determinar la importancia relativa de cada alternativa en la toma de decisión sobre el prototipo ideal y para calcular los pesos finales de cada criterio. La asignación de pesos se realiza en base a una escala donde 0 significa que un prototipo es menos importante que otro, 0.5 igual de importante, y 1 que un prototipo es más importante que otro. Estos pesos permiten agrupar y clasificar los prototipos según su importancia con relación a los criterios específicos (Tabla 2.1).

Tabla A.1 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Facilidad de conformación*

Facilidad de conformación	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)		1	1	3	0,5
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	0		0	1	0,17
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0	1		2	0,33
			suma	6	1

Tabla A.2 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Resistencia a la compresión y flexión

Resistencia a la compresión y flexión	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)		0	0	1	0,17
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	1		0	2	0,33
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	1	1		3	0,50
suma				6	1

Tabla A.3 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Nivel higroscópico

Nivel higroscópico	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)		1	0	2	0,33
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	0		0	1	0,17
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	1	1		3	0,5

suma	6	1
------	---	---

Tabla A.4 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Atenuación del ruido

Atenuación del ruido	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)		0,5	1	2,5	0,42
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	0,5		1	2,5	0,42
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0	0		1	0,17
suma				6	1

Tabla A.5 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Flamabilidad

Flamabilidad	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)		0	0	1	0,17
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	1		1	3	0,5
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero	1	0		2	0,33

galvanizado (BCM)		
suma	6	1

Tabla A.6 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Estética

Estética	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC) / Panel hexagonal	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC) / Bloque	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC) / Panel hexagonal		1	1	3	0,5
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC) / Bloque	0		0	1	0,17
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0	1		2	0,33
suma				6	1

Tabla A.7 Matriz alternativas-alternativas para el criterio Precio

Precio	Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC) / Panel hexagonal	Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC) / Bloque	Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	$\sum +1$	Ponderación
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC) / Panel hexagonal		1	1	3	0,5
Biocompuesto con recubrimiento de concreto	0		1	2	0,33

(BCC) / Bloque				
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	0	0	1	0,17
			suma	6
				1

Apéndice B. Densidad, pérdida de humedad y estabilidad dimensional

La tabla B.1 muestra los datos tomados en cuenta para obtener la densidad promedio del biocompuesto reportada en la sección 3.1.1. La tabla B.2 incluye los resultados recolectados del peso inicial y peso final de las muestras de biocompuesto tras el secado para estimar la pérdida de humedad. Y la tabla B.3 reporta el cambio dimensional que tuvieron las muestras con el porcentaje de encogimiento.

Tabla B.1 Resultados para cálculo de densidad del biocompuesto

Muestra	Peso (g)	Volumen (cm^3)	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)
60C40M1	11,0652	131,424	0,0841
60C40M2	10,9533	127,896	0,0856
60C40M3	13,9392	162,65	0,0857
Promedio	11,9859	140,625	0,0851

Tabla B.2 Resultados para cálculo de pérdida de humedad del biocompuesto

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida de humedad (%)
60C40M1	11,0652	9,4054	15
60C40M2	10,9533	9,0912	17
60C40M3	13,9392	11,7089	16
Promedio	11,9859	11,0255	16

Tabla B.3 Resultados para cálculo de pérdida de volumen del biocompuesto

Muestra	Volumen inicial (cm^3)	Volumen final (cm^3)	Encogimiento (%)
60C40M1	131,424	120,122	8,6

60C40M2	127,896	116,257	9,1
60C40M3	162,65	145,084	10,8
Promedio	140,625	127,265	9,5

Apéndice C. Consideraciones y datos para medir nivel de aislamiento acústico

La tabla C.1 ilustra las condiciones y valores relevantes para la experimentación de la generación de tonos. En la tabla C.2 se presenta la totalidad de datos recopilados tras el experimento en los diferentes medios por los cuales el tono viajó.

Tabla C.1 Consideraciones para generación de tonos

Condiciones para generación de tonos	Datos	Unidades
Frecuencia del tono	550	Hz
Tipo de ondas	Triangular	-
Distancia de sonómetro a fuente de ruido	2	cm
Temperatura	22	°C
Medidas muestra Biocompuesto	15x15x5	cm
Tiempo total de corrida equipo	RTMS	s
Nivel de presión de sonido máximo	LMAX	dB
Nivel de presión de sonido mínimo	LMIN	dB
Valor promedio de los niveles de presión en intervalos de tiempo	TAKM	dB
Nivel de presión de sonido instantáneo	SPL	dB

Tabla C.2 Resultados de ensayo de medición del nivel de absorción sonora

Fuente de ruido	Número de repeticiones	Exposición al ruido	Frecuencia del sonómetro (Hz)	RTM S (s)	LMA X (dB)	LMI N (dB)	TAKM (dB)	Promedio TAKM (dB)	Sonido absorbido (dB)
Generación de tonos a través de aplicación móvil	1	Directa o sin impedimento	1000	60	81,5	71,3	80,8	80,9	-
	2		1000	60	81	71,5	81,3	-	-
	3		1000	60	81,4	71,2	80,6	-	-
	1	Impedimento pared poliuretano	1000	60	77,2	71,6	75,4	73,5	7,4
	2		1000	60	74,2	71,6	73,1	-	-
	3		1000	60	73,4	71,6	72	-	-
	1	Impedimento biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)	1000	65	79,1	71,2	76	76,1	4,8
	2		1000	60	81,1	71,4	77,2	-	-
	3		1000	60	77,2	71,1	75	-	-
	1	Impedimento biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)	1000	66	76,1	73,3	76,1	76,2	4,7
	2		1000	60	79,7	73,6	76,3	-	-
	3		1000	61	78,4	73,3	76,2	-	-
	1	Impedimento biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)	1000	60	76,2	73,1	75,3	75,7	5,2
	2		1000	61	79,5	72,9	76,1	-	-
	3		1000	60	77,1	73,2	75,8	-	-

Apéndice D. Resultados de panel sensorial

En el panel sensorial, las muestras, antes de ser evaluadas en los ensayos de compresión y de flexión, fueron examinadas por un total de 15 personas considerando criterios de uniformidad, apariencia y olor. La tabla D.1 muestra las puntuaciones brindadas por cada persona en torno a uniformidad, donde 1 representaba a la estructura más desigual y 5 a la más uniforme.

Tabla D.1 *Panel sensorial para aceptación de uniformidad*

Tipo de producto	Panel hexagonal	Panel tipo sánduche	Bloque
Catador 1	3	1	1
Catador 2	2	2	1
Catador 3	3	4	0
Catador 4	3	3	0
Catador 5	4	3	0
Catador 6	3	1	1
Catador 7	4	1	0
Catador 8	2	2	0
Catador 9	3	1	0
Catador 10	2	3	0
Catador 11	4	3	0
Catador 12	2	2	1
Catador 13	1	1	0
Catador 14	3	2	0
Catador 15	1	1	1
Moda	3	1	0
Media	2,7	2	0,3
% Uniformidad	53,3	40	6,7

Las tablas D.2 y D.3 indican las calificaciones en relación a apariencia y a olor respectivamente, siendo 1 las más desagradables y 5 las más agradables.

Tabla D.2 *Panel sensorial para aceptación de apariencia*

Tipo de producto	Panel hexagonal	Panel tipo sánduche	Bloque
Catador 1	1	5	1
Catador 2	1	2	1
Catador 3	2	4	0
Catador 4	1	5	0
Catador 5	2	3	0
Catador 6	3	4	1
Catador 7	2	1	0
Catador 8	2	4	0
Catador 9	3	1	0
Catador 10	2	3	0
Catador 11	1	3	0
Catador 12	2	2	1
Catador 13	1	2	0
Catador 14	1	2	0
Catador 15	1	4	1
Moda	1	2	0
Media	1,7	3	0,3
% Apariencia	33,3	60	6,7

Tabla D.3 *Panel sensorial para aceptación de olor*

Tipo de producto	Panel hexagonal	Panel tipo sánduche	Bloque
Catador 1	1	4	2
Catador 2	2	1	3
Catador 3	4	3	0
Catador 4	3	2	0
Catador 5	3	3	0
Catador 6	1	2	2
Catador 7	1	2	0
Catador 8	2	3	0
Catador 9	1	1	0
Catador 10	3	1	0
Catador 11	3	1	0
Catador 12	2	2	4
Catador 13	1	2	0
Catador 14	2	2	0
Catador 15	1	1	4
Moda	1	2	0
Media	2	2	1
% Olor	40	40	20

Apéndice E. Ensayos mecánicos (compresión y flexión)

La tabla E.1 presenta los resultados de ensayos mecánicos de compresión en las muestras del biomaterial con diferente tipo de recubrimiento y la tabla E.2 los resultados mecánicos de flexión, teniendo en total 9 muestras, donde se deformaron y se tomaron sus respectivos valores al 50% de deformación y cuando alcanzaron el esfuerzo máximo.

Tabla E.1 *Datos de compresión de los tres prototipos del biocompuesto de micelio*

Muestra	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo (MPa) a 50% de deformación	Módulo elástico (MPa)
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)			
BC1	0,49	0,078	0,154
BC2	0,52	0,080	0,157
BC3	0,52	0,088	0,163
Promedio	0,51	0,082	0,158
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)			
BCC1	0,65	0,125	0,230
BCC2	0,63	0,123	0,229
BCC3	0,76	0,127	0,243
Promedio	0,68	0,125	0,234
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)			
BCM1	0,75	0,231	0,397
BCM2	0,79	0,237	0,390
BCM3	0,89	0,234	0,443
Promedio	0,81	0,234	0,410

Tabla E.2 *Datos de compresión de los tres prototipos del biocompuesto de micelio*

Muestra	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo (MPa) a 50% de deformación	Módulo elástico (MPa)
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)			
BC1	0,04	0,013	0,030
BC2	0,07	0,013	0,031
BC3	0,07	0,016	0,038
Promedio	0,06	0,014	0,033
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)			
BCC1	0,05	0,018	0,053
BCC2	0,08	0,022	0,055
BCC3	0,011	0,023	0,063
Promedio	0,08	0,021	0,057
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)			
BCM1	0,27	0,101	0,222
BCM2	0,31	0,105	0,220
BCM3	0,32	0,112	0,227
Promedio	0,30	0,106	0,223

Apéndice F. Análisis de costos y de inversión

Las tablas F.1 y F.2 presentan desgloses de los costos fijos y de los costos variables respectivamente para la elaboración de las opciones de diseño a partir del biocompuesto.

Tabla F.1 *Resumen de costos fijos para producción de biocompuesto*

Costos fijos	Cantidad	Costo mensual	Costo anual
Luz		\$30	\$360,00
Agua		\$20	\$240,00
Conexión a Internet		\$25	\$300,00
Limpieza		\$10	\$120,00
Alquiler de espacio		\$225	\$2.700,00
Remuneración	2	\$920	\$11.040,00
Transportación		\$40,00	\$480,00
Costos fijos totales		\$1.270,00	\$15.240,00

Tabla F.2 *Costos variables para cada producto a elaborarse con biocompuesto*

Costos variables	Costo unitario BC	Costo unitario BCC	Costo unitario BCM
Agar PDA	\$0,15	\$0,15	\$0,15
Fundas celofán	\$0,05	\$0,05	\$0,05
Cinta de papel	\$0,01		\$0,01
Cascarilla de arroz	\$0,27	\$0,27	\$0,27
Guantes	\$0,05	\$0,05	\$0,05
Mascarillas	\$0,01	\$0,01	\$0,01
Láminas de acero galvanizado			\$9,36
Resina epóxica			\$2,95
Arena		\$0,04	
Concreto		\$0,09	
Costo biocompuesto	\$0,54	\$0,66	\$12,85

Las tablas F.3 y F.4 reflejan las producciones correspondientes a los puntos de equilibrio necesarios para la fabricación de los bloques con concreto y los paneles tipo sánduche. Estas consideraciones permiten conocer el número de unidades que deben venderse para cubrir los costos del proceso.

Tabla F.3 *Rubros para producción en punto de equilibrio de bloque con concreto*

Detalle de los rubros	Valor
Costos fijos mensuales	\$1.270
Precio de venta BCC	\$3,00
Costo variable unitario BCC	\$0,66
Punto de equilibrio mensual	543
Punto de equilibrio anual	6513

Tabla F.4 *Rubros para producción en punto de equilibrio de panel tipo sánduche*

Detalle de los rubros	Valor
Costos fijos mensuales	\$1.270
Precio de venta BCM	\$28,00
Costo variable unitario BCM	\$12,85
Punto de equilibrio mensual	84
Punto de equilibrio anual	1006

La tabla F.5 indica el capital de inversión requerido para el comienzo del proyecto, separando los rubros en activos tangibles e intangibles.

Tabla F.5 *Desglose de gastos de capital como inversión inicial*

Inversión Inicial	Cantidad	Valor
Rubros intangibles		
Tasa inscripción Registro Mercantil	1	\$25,00
Registro, inscripción o concesión de derecho de Marcas	1	\$208,00
Autorización de uso y explotación de denominación de origen ecuatoriana	1	\$40,00
Total de intangibles		\$273,00
Rubros tangibles		
Sillas	4	\$8,00
Mesa industrial	1	\$100,00
Cajas Petri de vidrio	10	\$30,00
Mecheros	4	\$20,00
Autoclave laboratorio 30 L	1	\$500,00
Máscaras de protección respiratoria	4	\$60,00
Molde panel hexagonal	135	\$2.025,00
Total de tangibles		\$2.743,00
Total de capital invertido		\$3.016,00

En la tabla F.6, se observan las consideraciones tomadas para la estimación del mercado objetivo, abordado en la sección 3.4.

Tabla F.6 *Estimación del mercado*

Potencial mercado	900.000
Mercado objetivo	72.000
Cuota de mercado en primer año	16%
Incremento anual de participación en mercado	1,00%

Las tablas F.7-F.11 reflejan las proyecciones del mercado de forma anual dentro de un período de 5 años. Los valores de cuota de mercado de cada año fueron de utilidad para determinar la cantidad de productos que se espera vender conforme los años transcurren. Con

la ilustración de estas tablas, las ventas planificadas se registran de forma más detallada y permiten estimar la proyección de mercado de los años siguientes.

Tabla F.7 Proyección del mercado año 1

	Porcentaje (%)	Cantidades
Cuota de mercado año 1	16,00%	11.520
Número de paneles hexagonales estimado por año		1646
Precio de venta		\$10,00
Ingreso año 1		16457

Tabla F.8 Proyección del mercado año 2

	Porcentaje (%)	Cantidades
Cuota de mercado año 2	17,00%	12.240
Número de paneles hexagonales estimado por año		1.749
Ingreso año 2		17.486

Tabla F.9 Proyección del mercado año 3

	Porcentaje (%)	Cantidades
Cuota de mercado año 3	18,00%	12.960
Número de paneles hexagonales estimado por año		1.851
Ingreso año 3		18.514

Tabla F.10 Proyección del mercado año 4

	Porcentaje (%)	Cantidades
Cuota de mercado año 4	19,00%	13.680
Número de paneles hexagonales estimado por año		1.954
Ingreso año 4		19.543

Tabla F.11 Proyección del mercado año 5

	Porcentaje (%)	Cantidades
Cuota de mercado año 5	20,00%	14.400
Número de paneles hexagonales estimado por año		2.057
Ingreso año 5		20.571

La tabla F.10 muestran el flujo de caja, considerándose tanto los ingresos a reportarse cada año como los gastos en los que se incurre en cuanto a costos fijos, variables y capital de inversión para el desarrollo del proyecto. Restándose los ingresos de los gastos indicados, se obtiene un flujo neto de efectivo, lo que se interpreta como el monto de dinero a generarse o perder en un tiempo establecido.

Tabla F.10 *Flujo de caja del proyecto*

Flujo de caja	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos totales		\$16.457,14	\$17.485,71	\$18.514,29	\$19.542,86	\$20.571,43
Costos fijos		\$15.240,00	\$15.240,00	\$15.240,00	\$15.240,00	\$15.240,00
Costos variables		\$888,69	\$944,23	\$999,77	\$1.055,31	\$1.110,86
Egresos totales		\$16.128,69	\$16.184,23	\$16.239,77	\$16.295,31	\$16.350,86
Gastos de capital	\$-3.016,00					
Flujo neto	\$-3.016,00	\$328,46	\$1.301,49	\$2.274,51	\$3.247,54	\$4.220,57
Flujos No Descontados	\$-3.016,00	\$295,61	\$1.171,34	\$2.047,06	\$2.922,79	\$4.220,57
Flujo acumulado	\$-3.016,00	-\$2.720,39	-\$1.549,05	\$498,01	\$3.420,80	\$7.641,37

Apéndice G. Resultados ensayo de flamabilidad

La tabla G.1 muestra los datos recolectados de características identificables en las tres muestras de cada prototipo del biocompuesto luego de ser expuestas a la llama bajo un procedimiento indicado en la norma ASTM D 635-03.

Tabla G.1 *Datos del comportamiento a la flama de los tres prototipos del biocompuesto*

Muestra	TTI (s)	% pérdida de masa	TSR ($\frac{m^2}{m^2}$)
Biocompuesto sin ningún recubrimiento (BC)			
BC1	9	10	48
BC2	6	11	52
BC3	6	15	50
Promedio	7	12	50
Biocompuesto con recubrimiento de concreto (BCC)			
BCC1	2.500	7	55
BCC2	2.100	6	51
BCC3	2.000	11	53
Promedio	2.200	8	53
Biocompuesto tipo sánduche con láminas de acero galvanizado (BCM)			
BCM1	3.700	6	51
BCM2	3.850	8	49
BCM3	3.250	7	50
Promedio	3.600	7	50