



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción

Juliana Alzate Restrepo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción
Medellín, Colombia
2023

Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción

Juliana Alzate Restrepo

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Construcción

Director:

Ph.D. Carlos Mauricio Bedoya Montoya

Codirectora:

Ph.D. Edith Marleny Cadena Chamorro

Línea de Investigación:

Biomateriales

Grupo de Investigación:

Construcción sostenible

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura. Escuela de Construcción
Medellín, Colombia

2023

Dedicatoria

A las mujeres que rodean mi vida y a mi hermano.

Agradecimientos

Le agradezco al poder de la naturaleza que me brinda todas las herramientas para entender la existencia, que funciona como red, así como lo hace el micelio.

Le agradezco al profesor, PhD Carlos Mauricio Bedoya M. por ser parte de esta red, porque con su experiencia y conocimiento supo conectarme con muchas personas que hicieron posible el desarrollo de esta investigación, además por no coartarme y demostrar siempre su apoyo y entusiasmo con el proyecto.

Le agradezco a la profesora, PhD Edith Cadena C. por su amabilidad y gran ayuda en el desarrollo del biomaterial, abriéndome las puertas del laboratorio de Procesos Agrícolas, por aportarme conocimiento y estar atenta a todas mis dudas.

Y mis agradecimientos:

A Érika Arango por la ayuda en el laboratorio de Procesos Agrícolas - Facultad de Ciencias Agrarias, a la profesora Yamile Valencia y Ángela Barreto, por la ayuda en los ensayos a compresión simple en laboratorio de Suelos y Geotecnia - Facultad de Minas. Al profesor Héctor Velásquez A. y Álvaro Domínguez por la ayuda en el ensayo de placas calientes en el laboratorio Máquinas y Sistemas térmicos - Facultad de Minas. A David Pérez por su colaboración en el ensayo acústico en tubo de impedancia - Universidad Sanbuenaventura. A Felipe Betancourt de la empresa Dexco S.A. por su amabilidad y gestión para proporcionarme el sustrato. Al profesor Cristian Santa por su ayuda en el componente estadístico del trabajo y a Román por su ayuda en el proceso del cultivo.

Resumen

Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción

Esta investigación evalúa el desarrollo de un biomaterial a base de micelio y residuos madereros, como iniciativa hacia la mitigación de la degradación ambiental que genera el campo de la construcción, responsable del 37% de las emisiones totales de CO₂. El micelio es la estructura vegetativa en forma de red de hongos descomponedores de compuestos lignocelulósicos, a través de enzimas que excreta la pared celular de sus filamentos llamados hifas, que rompen los polímeros del sustrato en el que se encuentra en moléculas de fácil absorción, generando una especie de aglutinante natural. Debido a esta capacidad, el micelio ha sido de gran interés investigativo en el desarrollo de materiales con aplicación en diversos campos, como el del arte, la arquitectura, la construcción, entre otros. Para este caso, se preparan muestras con un sustrato conformado por desechos madereros, obtenidos de la industria maderera local. Las muestras cultivadas son procesadas con dos tipos de recubrimientos y sometidas a pruebas mecánicas: ensayo de compresión simple para conocer su capacidad a compresión, y ensayo de placas calientes para la determinación de la conductividad térmica. Se realizan pruebas complementarias para conocer el coeficiente de absorción acústico y el porcentaje de absorción de agua. El resultado es un material liviano semejante al poliestireno expandido, presenta conductividad térmica baja, $k = 0.082 \text{ W/mk}$ y un coeficiente de absorción acústica de 0.90 para un rango de frecuencia entre 250-2000 Hz, valores que pueden competir materiales termo-acústicos que no estén en contacto con el agua, ya que puede absorberla con rapidez. En conclusión, el biomaterial tiene potencial en el campo de la construcción sostenible en desarrollos de paneles que funcionen de aligerantes del hormigón o como absorbentes de calor y ruido.

Palabras clave: Biomaterial; capacidad mecánica, construcción sostenible, Micelio, residuos madereros.

Abstract

Development of mycelium-based biomaterial and wood waste for the construction field

This research evaluates the development of mycelium-based biomaterial and wood waste, as an initiative towards the mitigation of environmental degradation generated by the construction field, which is responsible for 37% of total CO₂ emissions. Mycelium is the vegetative structure of fungi, with filamentous cells called hyphae which are capable of degrading lignocellulosic compounds through a variety of enzymes that can break down biological polymers into easily absorbed molecules, generating a kind of a natural binder. Due to this capacity, mycelium has been of great research interest in the development of materials with applications in various fields, such art, architecture, and construction materials, among others. The substrate used to grow the biomaterial comes from wood waste from the local wood industry. The cultured samples are processed with two types of coatings and subjected to mechanical test: a simple compression strength test to determine their compressive strength and a hot plate test to determine their thermal conductivity. Additional tests are conducted to determine the acoustic absorption coefficient and the percentage of water absorption. The result is a lightweight material similar to expanded polystyrene, with low thermal conductivity ($k = 0.082 \text{ W/mK}$) and an acoustic absorption coefficient of 0.90 for a frequency range between 250-2000 Hz. These values can compete with thermal-acoustic materials that are not in contact with water, as it can rapidly absorb it. In conclusion, the biomaterial has potential in the field of sustainable construction for developing panels that act as lightweight concrete additives or as heat and noise absorbers.

Keywords: Biomaterial; mechanical capacity; mycelium; sustainable construction; wood waste

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Objetivos.....	1
1. Capítulo 1 ¿Cómo se forma el Micelio?	3
1.1 ¿Qué es el Micelio?.....	3
1.2 ¿Qué compone a la red de micelio?.....	5
1.3 Hongo: Organismo descomponedor.....	6
1.4 Desarrollo general de un compuesto a base micelio	7
1.4.1 Especie de hongo.....	8
1.4.2 Tipo de sustrato.....	10
1.4.3 Método de esterilización	13
1.4.4 Método de inoculación.....	14
1.4.5 Tipo de fermentación	14
1.4.6 Procesos durante el empaque o formado	15
1.4.7 Condiciones ambientales y tiempo de cultivo.....	16
1.4.8 Método de secado	16
1.4.9 Post-procesamiento.....	17
2. Capítulo 2: ¿Qué se ha logrado con el micelio?	19
2.1 Proyectos experimentales de compuestos a base de micelio	20
2.1.1 Proyección artística	21
2.1.2 Material para construcción.....	22
2.1.3 Empaques – Cuero - Espuma.....	24
2.1.4 Material aislante.....	25
2.1.5 Diseños arquitectónicos – Paneles acústicos	25
2.2 Propiedades de los materiales a base de micelio desde la perspectiva investigativa.....	26
2.3 Potencial ambiental de materiales a base de micelio	30
3. Capítulo 3: Desarrollo del biomaterial y caracterización físico- mecánico	45
3.1 Especie de hongo “ <i>Pleurotus ostreatus</i> ”.....	45
3.2 Sustrato y preparación	49
3.3 Metodología de cultivo del biomaterial.....	52

3.4	Caracterización del biomaterial	59
3.4.1	Ensayo de compresión simple	59
3.4.2	Determinación de conductividad térmica (Método de la placa caliente)	60
3.5	Resultados y discusión	63
3.5.1	Resultados ensayo de compresión simple.....	63
3.5.2	Resultados de la determinación de la conductividad térmica.....	81
3.5.3	Pruebas complementarias	90
3.5.4	Aplicaciones del biomaterial en el campo de la construcción.....	98
3.5.5	Macro y microscopía del desarrollo del micelio.....	100
3.6	Comparación de materiales	102
3.6.1	Desarrollos con el hongo <i>Pleurotus ostreatus</i>	102
3.6.2	Propiedades de materiales vs material a base de micelio	104
4.	Conclusiones y recomendaciones	107
4.1.1	Conclusiones.....	107
4.1.2	Recomendaciones.....	109
	Referencias	111
A.	Anexo: Cálculo estadístico-Ensayo a compresión.....	117

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Representación del micelio (Fuente: Elsacker et al., 2020)	5
Figura 1-2 Esquema del método de producción de un biomaterial a base de micelio (Fuente: Adaptado de Elsacker et al., 2020).....	8
Figura 2-1 Capacidad reino fúngico en la industria (Fuente: Meyer et al., 2020)	20
Figura 2-2 Materiales a base de Micelio: A. Torre Hy-fi. B. Ladrillo de Torre Hy-fi. C. Cuero. Mycoworks. D. Bloques. MycoHAB. E. Paneles acústicos. Mogu. F. Vestido. Aniela Hoitink - Fungal Futures. G. Empaques. Ecovative. H. Espuma. Ecovative (Fuente: A-B.Holcim Foundation: Sustainable Construction, 2015. C.MycoWorks, 2023. D. MycoHAB, 2023. E.Mogu, 2022. F.Nai & Meyer, 2016. G-H.Ecovative, 2023)	26
Figura 2-3 Comparación del impacto de un bloque de micelio en sustrato de cáñamo a escala de laboratorio respecto a una escala industrial (Fuente:Stelzer et al., 2021).....	35
Figura 2-4 Límites de es estudio para ACV de a) Inserto de poliestireno expandido b) Incerto a base de micelio.(Fuente:Enarevba & Haapala, 2023)	38
Figura 2-5 Impactos ambientales de insertos de EPS y micelio usando ReCiPe 2016 Endpoint (Fuente: Enarevba & Haapala, 2023)	39
Figura 2-6 Comparación de huella de carbono entre cuero animal y cuero Reishi™ (Fuente:Williams et al., 2022)	43
Figura 2-7 Resultados a medio punto de análisis del impacto del ciclo de vida	44
Figura 3-1 Degradación de la lignocelulosa - Pleurotus ostreatus (Fuente: Elaboración propia a partir de Royse, 2017)	48
Figura 3-2 Conformación del sustrato. A: Aserrín, B: Fibras de Eucalipto y Pino, C: Fibra de fique, D: Chips.....	50
Figura 3-3 Preparación del sustrato. A: Mezcla de sustrato. B: Sustrato en bolsas autoclavables. C: Sustrato mezclado para esterilización	51
Figura 3-4 A Sustrato inoculado en bolsas – Fase 1: Colonización del hongo. B. Muestras en formaletas – Fase 2. C. Homogenización de las muestras	55
Figura 3-5 Recubrimiento tanino Quebracho. A: Preparación. B: Tanino sobre placa. C: Tanino sobre cilindros	58
Figura 3-6 Recubrimiento - Mortero de cal sobre cilindros.....	58
Figura 3-7 Metodología del cultivo del biomaterial (Fuente: Elaboración propia – Software Wondershare EdrawMax).....	59
Figura 3-8 Montaje del método, placa caliente (Fuente: Standard Test Method for Steady- State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus 1, 2015)	62

Figura 3-9 Montaje ensayo a compresión – Recubrimiento quebracho y recubrimiento mortero de cal.....	64
Figura 3-10 Deformación de muestras A: Montaje muestra sin chips – Quebracho. B: Deformación. C: Deformación según recubrimiento. D: Montaje muestra con chips – Cal. E: Deformación muestras sin chips – Cal.....	68
Figura 3-11 Esfuerzo Vs Deformación: A. Quebracho - Sin Chips B. Quebracho – Chips C. Cal - Sin Chips D. Cal - Chips	69
Figura 3-12 Esfuerzo - Deformación - Sustrato - Recubrimiento	72
Figura 3-13 Distribución normal	77
Figura 3-14 Homogeneidad de varianza	78
Figura 3-15 Distribución normal, modelo ajustado	79
Figura 3-16 Homogeneidad de varianzas, modelo ajustado.....	80
Figura 3-17 Esfuerzo medio de datos experimentales Vs Esfuerzo modelo predictivo....	81
Figura 3-18 Partes del montaje – ensayo de conductividad térmica.....	82
Figura 3-19 Montaje del sistema placa caliente en funcionamiento.....	83
Figura 3-20 Espina de pescado, incertidumbres de k (Fuente: Elaboración propia)	86
Figura 3-21 Conductividad térmica en materiales (Fuente: Elaboración propia).....	89
Figura 3-22 Conductividad térmica para diferentes estados de la materia y sistemas aislantes (Fuente: Incropera et al., 2007)	90
Figura 3-23 Representación de la onda acústica dentro el tubo de impedancia (Fuente: Acústica. Determinación Del Coeficiente de Absorción Acústica y de La Impedancia Acústica En Tubos de Impedancia. Parte 1: Método Del Rango de Onda Estacionaria, ISO 10534-1:1996)	91
Figura 3-24 Ensayo acústico A. Muestras de biomaterial B. Muestra en extremo del tubo. C. Tubo de impedancia	92
Figura 3-25 Curva de audición humana (Fuente:Cochlea, n.d.)	95
Figura 3-26 Proyección de material a base de micelio A: Sándwich de fibras orientadas. B: Sándwich con placas de hormigón (Fuente: Adaptado de Ramli Sulong et al., 2019).	99
Figura 3-27 Sistema de muro seco-proyección del biomaterial A: Montaje muro seco. B: Material aislante al interior del muro seco (Fuente: adaptado de Máquinas y herramientas, 2018).....	100
Figura 3-28 Desarrollo del micelio a escala macro	101
Figura 3-29 Desarrollo del micelio a escala micro	102

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Especies de hongos mencionadas en patentes (Fuente: Cerimi et al., 2019)	9
Tabla 1-2 Degradación según la clase del hongo (Fuente: adaptada de Royse, 2017) ..	12
Tabla 1-3 Lignocelulosa en residuos agrícolas y forestales (Fuente: Royse, 2017)	12
Tabla 2-1 Ejemplos de empresas comercializadores de productos a base de micelio (Fuente: Elaboración propia)	21
Tabla 2-2 Procesos y materiales usados para la producción de un bloque de micelio (Fuente: Adaptado de referencia Stelzer et al., 2021)	31
Tabla 2-3 Categoría de impacto/unidad/método de evaluación (Fuente: adaptado de Stelzer et al., 2021)	32
Tabla 2-4 Resultados de la cuantificación del impacto de categorías para un bloque en sustrato de cáñamo (Fuente: Stelzer et al., 2021)	33
Tabla 2-5 Comparación de la producción de un bloque en sustrato de paja y en sustrato de astillas de madera respecto al bloque en sustrato de cáñamo (Fuente: Stelzer et al., 2021)	34
Tabla 2-6 Comparación del impacto ambiental de un bloque de micelio en sustrato de cáñamo a escala de laboratorio respecto a bloques de materiales convencionales (Fuente: Stelzer et al., 2021)	36
Tabla 2-7 Huella de carbono para cada escenario de producción de Reishi (Fuente: Williams et al., 2022)	42
Tabla 3-1 Contenido de lignocelulosa en sustrato (Fuente: Elaboración propia)	51
Tabla 3-2 Condiciones de cultivo - ensayo a compresión	53
Tabla 3-3 Condiciones de cultivo – ensayo de placas calientes	54
Tabla 3-4 Cantidad de muestras - Ensayo a compresión (Fuente: Elaboración propia) ..	63
Tabla 3-5 Características físicas de las muestras - Recubrimiento – quebracho (Fuente: Elaboración propia)	64
Tabla 3-6 Características físicas de las muestras - Recubrimiento - mortero de cal (Fuente: Elaboración propia)	65
Tabla 3-7 Resultados deformación, esfuerzo, módulo de elasticidad - Recubrimiento mortero de Cal sin chips y con chips (Fuente: Elaboración propia)	65
Tabla 3-8 Resultados deformación, esfuerzo, módulo de elasticidad - Recubrimiento mortero de Quebracho sin chips y con chips	67
Tabla 3-9 Factores fijos - (Fuente: Elaboración propia)	70
Tabla 3-10 Cuadro ANOVA (Fuente: Elaboración propia)	73
Tabla 3-11 Cuadro ANOVA – Ajuste (Fuente: Elaboración propia)	75
Tabla 3-12 Cuadro ANOVA – Significativo (Fuente: Elaboración propia)	76

Tabla 3-13 Modelo de regresión lineal (Fuente: Elaboración propia).....	78
Tabla 3-14 Lectura de temperatura, corriente y voltaje (Fuente: Elaboración propia).....	83
Tabla 3-15 Geometría de las placas (Fuente: Elaboración propia).....	84
Tabla 3-16 Cálculo de la conductividad térmica k (Fuente: Elaboración propia).....	84
Tabla 3-17 Resolución del instrumento (Fuente: Elaboración propia)	84
Tabla 3-18 Desviación estándar de la Temperatura (Fuente: Elaboración propia)	87
Tabla 3-19 Incertidumbre para la temperatura (Fuente: Elaboración propia).....	87
Tabla 3-20 Coeficientes de sensibilidad (Fuente: Elaboración propia)	87
Tabla 3-21 Incertidumbre combinada estándar (Fuente: Elaboración propia)	87
Tabla 3-22 Conductividad térmica del biomaterial (Fuente: Elaboración propia)	88
Tabla 3-23 Conductividad térmica de materiales aislantes térmicos usados en construcción (Fuente: Elaboración propia a partir de Incropera et al., 2007)	88
Tabla 3-24 Cálculo del coeficiente de absorción (Fuente: Elaboración propia)	94
Tabla 3-25 Absorción acústica de diferentes materiales (Fuente: Flores et al., 2013).....	95
Tabla 3-26 Dimensiones y densidad de las muestras (Fuente: Elaboración propia).....	96
Tabla 3-27 Peso de las muestras sumergidas en el tiempo (Fuente. Elaboración propia)	97
Tabla 3-28 % de absorción de las muestras (Fuente: Elaboración propia).....	97
Tabla 3-29 Comparación de materiales desarrollados con Pleurotus ostreatus	103
Tabla 3-30 Propiedades material a base de micelio con otros materiales	105

Introducción

El humano, la especie que razona y que se autonostró dueña del mundo, en sus ansias y también en sus crisis, devora gradualmente su lugar: la tierra. Aunque el planeta no es lo que está en riesgo, lo que se evidencia, paradójicamente, es una práctica de autodestrucción, gracias a su alto grado de egoísmo por pensar que la tierra no es para mantenerse y coexistir con los demás seres vivos a lo largo del tiempo. Por tanto, el hombre se redujo al servicio de sus necesidades, nombrando como “recursos” a todo lo que puede usar y desde un pedestal de soberanía, aplastando el respeto por su entorno, no considera que dichos “recursos” no son para su codicia. Sin embargo, este, también tiene la capacidad en entender a la naturaleza como parte de su génesis y esta bondad le proporciona herramientas o más bien instintos, como especie, de cuidar su hábitat, por eso existen muchas voluntades e ideas que aportan a este propósito y este trabajo en una mínima fracción de ellas.

Las actividades que comprometen la integridad del ambiente y su ecosistema, están relacionadas con el aumento de la población, que para su sostenimiento requiere un incremento en el consumo energético, en el abastecimiento de alimentos (agricultura), en la industria del transporte, y en la infraestructura para vivienda. Existen reportes oficiales basados en investigación científica que cuantifica y sustenta el problema, por ejemplo, el reporte del programa de medioambiente de Las Naciones Unidas – 2022” (United Nations Environment Programme, 2022b) que través de métodos científicos permite conocer la verdadera dimensión e importancia de la crisis climática, y por ende la urgencia de estudiarla para establecer medidas de acción. También se encuentran los reportes “Global Status Report for buildings and construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector” (United Nations Environment Programme, 2022a) y “Emissions Gap Report 2022: The Closing Window - Climate crisis calls for rapid transformation of societies” (United Nations Environment Programme, 2022a) que hablan

de la contaminación causada por los sectores industriales y entre ellos se encuentra el sector de la construcción.

El sector de la construcción es responsable de ser fuente emisora de gases de efecto invernadero, aporta al 37% de las emisiones de CO₂ globales (United Nations Environment Programme, 2022a). El dióxido de carbono CO₂ es el gas más significativo, seguido por metano, óxido nitroso y vapor de agua; gases que desencadenan un aumento en la temperatura global. Este aumento provoca efectos nocivos en todo el planeta como deshielos, inundaciones, aumentos del nivel del mar, daños en los ecosistemas, eventos climáticos extremos, entre otros. (Morris, 2017).

Como consecuencia de la demanda energética de los edificios en el año 2021 se presentó incremento de emisiones de CO₂ de aproximadamente un 5% respecto al año 2020, que alcanzan alrededor de 10 GtCO₂ y supera en un 2% al 2019. El 28% de las emisiones viene de la energía consumida en la operación de las edificaciones, sin tener en cuenta la fabricación de materiales. El 9% de las emisiones globales de CO₂ corresponde a la extracción materiales para los trabajos relacionados con la construcción, que es una cantidad no muy significativa comparada con las emisiones de gases de CO₂ que aporta la industria y el transporte pero que, sumada con las emisiones totales, genera preocupación y desconcierto (United Nations Environment Programme, 2022b).

Por lo tanto, si no se adoptan medidas adicionales que aceleren las políticas vigentes de descarbonización, para finales de este siglo se producirá un aumento en la temperatura global de 2.8°C, trayendo consecuencias devastadoras para los ecosistemas y para las personas. Una de las medidas de transformación para lograr el objetivo de cero emisiones en el sector de la construcción, es la implementación de estrategias como el uso de materiales reciclados que, según el informe "Situación mundial de los edificios y la construcción en 2022" (United Nations Environment Programme, 2022b), tienen un inmenso potencial en la reducción de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la presente investigación es una iniciativa a la contribución de estrategias para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción. Si bien las acciones individuales no suponen un cambio significativo, sí suman al conjunto que puede impulsar cambios sistemáticos de mayor alcance. Por lo tanto, desde el área de los materiales se plantea la utilización de residuos madereros para

que sean incorporados nuevamente dentro de un ciclo útil, a través de la aglomeración producida por alternativas biotecnológicas, específicamente por la intervención de la estructura vegetativa de los hongos conocida como micelio. Por lo tanto, el objetivo consiste en el desarrollo de un material a base del micelio del hongo *Pleurotus ostreatus* y residuos madereros, residuos evaluados como sustrato potencial para el cultivo del biomaterial, para ser ensayado mediante pruebas físico-mecánicas que determinen su capacidad y potencial en el sector de la construcción. La metodología para el cultivo, se basa en antecedentes y prácticas que han experimentado el desarrollo de materiales con organismos vivos, y su formación biológica se puede mimetizar en compuestos innovadores y equilibrados con el ambiente; ya que estos materiales tienen la capacidad de degradarse en corto plazo (meses) una vez es desechado y en términos de eficiencia productiva, tiene gran potencial por no requerir equipamientos complejos ni costos (Haneef et al., 2017).

La aglomeración a través del micelio resulta en un compuesto cuyas propiedades mecánicas permiten reducir el uso de materiales convencionales provenientes de combustibles fósiles, reduciendo las emisiones de CO₂ ya que su manufactura es sencilla y de bajo costo, recupera residuos orgánicos y sobre todo porque es biodegradable, convirtiéndose en una solución innovadora, acorde con la transición de la economía circular (Meyer et al., 2020).

En la actualidad se tienen investigaciones y proyectos independientes que han explorado el uso del micelio en la creación de compuestos para el campo textil, para la industria de empaques, para el campo arquitectónico, campo artístico, mostrando un beneficio ambiental muy valioso, ya que pueden proyectarse como un sustituto paulatino de materiales como el poliestireno expandido, el cuero, entre otros. También determinan su viabilidad técnica para la aplicación en el sector de la construcción, ya que pueden desarrollarse paneles, bloques, aislantes térmicos y acústicos, generando líneas de investigación de acuerdo a todas las variables que comprende su producción, para ampliar, mejorar y promover su uso dentro de materiales alternativos que reduzcan la degradación ambiental (Elsacker et al., 2020).

En los siguientes capítulos, se expone el concepto de lo que es el micelio, cómo es su crecimiento y qué lo hace un organismo descomponedor de residuos orgánicos,

introcporando con base en antecedentes, las variables del desarrollo genérico de biomateriales a base de micelio. Se exhiben exploraciones de su cultivo y aplicación desde diferentes campos, a partir de perspectivas científicas e industriales que estudian la prometedora viabilidad de la tecnología fúngica. Se promueve la reutilización residuos a partir de soluciones innovadoras y sostenibles que ayudan a reducir la dependencia de los materiales a base de combustibles fósiles. Se describe la metodología utilizada para el cultivo del biomaterial, obteniendo especímenes conformados con residuos madereros del sector (Aserrín, astillas y fibras), donde se aplican dos tratamientos como recubrimiento. Los especímenes tienen dimensiones estandarizadas de acuerdo a las normas de los ensayos, que corresponden a la prueba de compresión simple para conocer la resistencia mecánica y a la prueba de placas calientes para la determinación de la conductividad térmica. También se realizan pruebas complementarias para conocer el coeficiente de absorción acústica y el porcentaje de absorción de agua. Por último, mediante un análisis estadístico se analizan los resultados y su alcance dentro del campo de la construcción.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un material compuesto a base de micelio del hongo *Pleurotus ostreatus* y residuos madereros para su aplicación en el sector de la construcción.

Objetivos específicos

- Evaluar el uso de residuos madereros como sustrato del hongo *Pleurotus ostreatus* para el desarrollo de un material compuesto a base de micelio.
- Evaluar el potencial de aplicación de materiales compuestos a base de micelio en el sector de la construcción en función de propiedades físico-mecánicas.
- Establecer una metodología de procesamiento para la obtención de materiales alternativos en construcción a base de micelio.

1.Capítulo 1 ¿Cómo se forma el Micelio?

“Los hongos son organismos que están en la interface entre la vida y la muerte”.
(Stamets, 2005).

En este capítulo se introduce el concepto general de lo que es el micelio, su composición, morfología y condiciones necesarias para su crecimiento. Este conocimiento es crucial en la comprensión de la capacidad del micelio para degradar materiales orgánicos y cómo esta determina las diversas características y propiedades morfológicas que puede adoptar. Como consecuencia del crecimiento fúngico se obtienen productos aglomerados. Estas características abren un camino de posibilidades para la creación de materiales alternativos, es decir, compuestos a base de micelio con aplicación en diversos campos, como la construcción, arquitectura, medicina, industria textil, entre otros.

En el mundo de los hongos residen los grandes recicladores del planeta, tienen la capacidad de degradar la naturaleza muerta de cualquier tipo, plantas, insectos, mamíferos, para preparar un ecosistema donde se conformará nuevamente la vida (Staments, 2005).

1.1 ¿Qué es el Micelio?

El micelio, es la estructura vegetativa del hongo, es decir, es un organismo vivo que tiene forma de red y crece dentro de una matriz compuesta por material orgánico, bajo unas condiciones de humedad y temperatura específicas (Elsacker et al., 2019; Haneef et al., 2017). Así que puede hablarse de un tejido fino de ramificaciones llamadas hifas, que crecen al interior del suelo y conecta a la naturaleza, realizando transferencia de nutrientes, de información mediante una relación simbiótica con las plantas y el resto de organismos,

aportando beneficios para el correcto funcionamiento de los ecosistemas. Estos hongos pertenecen al grupo de saprofitos (descomponen organismos muertos) y micorrizas (aporte de nutrientes) (Stamets, 2005).

Esta red no es estática, se encuentra en constante crecimiento y regeneración donde se constituyen las hifas como canales especializados de alta conductividad, para realizar diferentes funciones, como el crecimiento vegetativo, nutrición local a través de la delignificación, colonización del sustrato, morfogénesis, reproducción, dispersión, protección al daño (mecanismos de defensa) y a depredaciones (Bartnicki, 1968; Royse, 2017).

El crecimiento del micelio depende del tipo de hongo, y se encuentra condicionado a variables ambientales y características del medio de cultivo o sustrato en el que crece (Vanden, 2021); algunos tipos, por su composición biológica, presentan capacidad para degradar materiales lignocelulósicos, en los que se destaca la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina que proporciona rigidez a materiales vegetales (Ross, 2016).

Las raíces o filamentos llamadas hifas, son células tubulares que crecen unidireccionalmente desde una espora (análogo a la semilla de árbol) en un determinado sustrato. Las características de estos filamentos varían según el tipo de hongo y el medio donde se encuentra. El crecimiento se genera por un proceso llamado "*tip extension*", que ocurre a través de la extensión de la membrana celular y de la pared celular en la punta de la hifa, donde al absorber nutrientes se va alargando. Durante este proceso, van creciendo repetidamente nuevas hifas formando ángulos entre 42° y 47° respecto a la hifa central, armando un fractal de colonias en forma de árbol. Esta interconexión aleatoria a través de la fusión de las hifas o anastomosis, generan una estructura de fibras cruzadas, es decir, un tejido que finalmente es el micelio (Islam et al., 2017; Vanden, 2021)

Otra característica del crecimiento es la capacidad de "auto-soldarse", es decir de regenerarse como respuesta al rompimiento de fibras causadas por daños locales. La regeneración de las hifas y las nuevas ramificaciones mejoran la conductividad y aumentan la resistencia al daño. Esto crea una red más densa y robusta, características con altos potenciales en el desarrollo de materiales a base de micelio (Elsacker et al., 2020).

1.2 ¿Qué compone a la red de micelio?

Las hifas, filamentos que conforman la red de micelio, son células tubulares, con diámetros típicos entre 1-30 μ (Islam et al., 2017), separadas entre sí por una pared transversal interna de poros llamada Septo, todo este conjunto está contenido dentro de una pared celular tubular que tiene múltiples funciones, como proteger a las hifas y proveer resistencia mecánica a todo el micelio (Haneef et al., 2017). Estas funciones se derivan de la composición de la pared celular, donde del 80 a 90% son polisacáridos y el resto, casi siempre consiste en proteínas o lípidos, entre los que se destacan componentes como quitina, B-glucanos. Físicamente se representa como un tejido de microfibrillas entrecruzadas o cementadas por sustancias de matriz amorfa. La quitina y la celulosa son el componente esquelético de la pared, componente fundamental encontrada dentro de las capas internas de la hifa (Islam et al., 2017) que, inclusive en cantidades pequeñas, proporciona integridad estructural y aporta propiedades mecánicas al micelio. Las proteínas y diversos polisacáridos como los glucanos, mananos, galactanos, heteropolisacáridos, son sustancias que probablemente tienen propiedades cementante aglutinando los diferentes componentes estructurales de la pared celular en complejos macromoleculares. El desarrollo morfológico del hongo depende de la morfogénesis de la pared celular, en pocas palabras, la pared celular, define al hongo y lo distingue de otros organismos vivos. (Bartnicki, 1968). La Figura 1-1, muestra la conformación del micelio desde una matriz hasta la pared celular de la hifa.

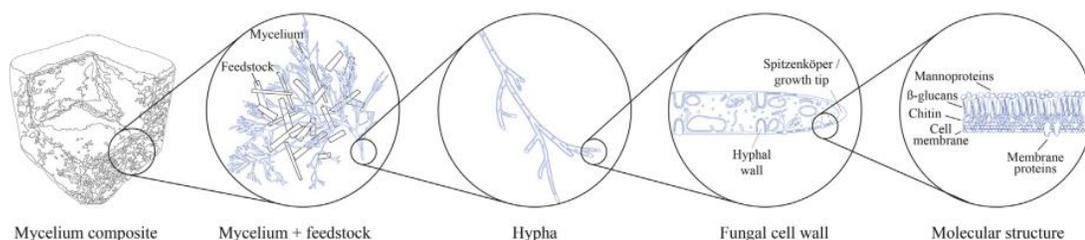


Figura 1-1 Representación del micelio (Fuente: Elsacker et al., 2020)

El micelio al tener este tipo de compuestos en su pared celular, que funcionan como polímeros cementantes, genera una matriz con atributos elásticos y rígidos, que dependiendo del sustrato en el que se encuentre, hace atractivo el desarrollo de materiales

(Elsacker et al., 2020). Por ejemplo, cuando se tiene un sustrato que contiene más azúcares, se generan ácidos grasos, proporcionando mayor elasticidad que rigidez en el compuesto; en contraste cuando el micelio crece en celulosa, donde debe sintetizar la quitina, esta es más difícil de penetrar, resultando un material más rígido (Haneef et al., 2017). Lo anterior hace parte de un estudio donde se cultivaron dos especies de hongos, *Ganoderma lucidum* y *Pleurotus ostreatus*, en dos sustratos controlados, celulosa y caldo de papa dextrosa, medio común para promover el crecimiento de hongos y rico en azúcar. El crecimiento de los hongos en estos medios genera un efecto en la morfología, en las propiedades químicas y físicas de las hifas, y a su vez en toda la matriz del compuesto de micelio. De esta manera se puede realizar diferentes combinaciones en el sustrato y generar una diversidad en la estructura del micelio, útil para múltiples aplicaciones, mientras más rígido sea al sustrato, más rígido es la matriz de micelio, por lo tanto, las propiedades de este tipo de compuestos están estrechamente relacionadas con la composición y los nutrientes del sustrato. (Haneef et al., 2017). Es importante mencionar que el sustrato es una de las variables del compuesto, existen otras como la especie de hongo, condiciones de crecimiento, métodos de fermentación que aportan otras propiedades y efectos al material (Vandelook et al., 2021).

1.3 Hongo: Organismo descomponedor

Los hongos que pertenecen al grupo de basidiomicetos, son hongos de raíces blancas, que crecen en de diversos sustratos orgánicos compatibles con su naturaleza, absorben nutrientes a través de la degradación del sustrato, rompiendo los polímeros que se encuentran en él, por una secreción de enzimas que se oxidan y transforman el material para tomar los nutrientes y generar una especie de aglutinante (Garcés et al., 2003).

Las enzimas son moléculas que aceleran un determinado proceso químico, en este caso, corresponde a un proceso de degradación de la lignina o hidrólisis de celulosa (Haneef et al., 2017). Estas enzimas son inducidas en respuesta al material orgánico en el que el hongo se encuentre (Garcés et al., 2003) y cuando se encuentra en sustratos madereros, las enzimas excretadas por la pared celular de la hifa para descomponer la lignina, corresponden a Lacasas y Peroxidasas, que al oxidarse cambian la estructura molecular de la lignina, convirtiéndola en un material soluble para absorber los nutrientes (proteínas, grasas, carbohidratos), es decir, la secreción de enzimas degradan el sustrato

lignocelulósico en compuestos de bajo peso molecular de más fácil absorción para realizar sus funciones básicas de crecimiento y fructificación (Royse, 2017), para el contexto de biomateriales se orienta a suprimir el fructífero, obteniendo solo el micelio que debido al proceso de degradación conforma un adhesivo (Elsacker et al., 2019) y (Vanden, 2021).

1.4 Desarrollo general de un compuesto a base micelio

A continuación, se identifican las variables implicadas en el cultivo y se indica el protocolo del crecimiento. A pesar de que no está estandarizado y las experimentaciones encontradas en la literatura amplían el espectro de los métodos generando brechas e incertidumbre en el procedimiento, se ha compilado la información desde artículos, patentes, manuales para presentar el siguiente protocolo general (Vanden, 2021). En la Figura 1-2 se ilustra el procedimiento típico.

1. Constituir la semilla que se utilizará en el crecimiento con el sustrato una vez se tiene el hongo seleccionado. El hongo es inoculado en un medio líquido o sólido, para obtener el micelio de manera homogénea en granos o en líquido.
2. Preparar y esterilizar el sustrato húmedo para eliminar todo tipo de contaminación y prevenir el crecimiento de otros organismos durante el tiempo de incubación que puedan competir o inhibir el crecimiento del hongo.
3. El sustrato es inoculado con el grano del hongo obtenido en el paso 1.
4. La mezcla anterior es colocada en el recipiente con la forma deseada. El recipiente y el lugar de trabajo debe ser esterilizado previamente. Una vez el sustrato adentro, el molde se sella, pero debe garantizarse el flujo del aire para generar un microclima promover el crecimiento al interior del sustrato.
5. Se da lugar a la colonización del sustrato por parte del hongo durante un tiempo específico, bajo condiciones ambientales controladas para obtener el crecimiento del micelio.
6. El compuesto de micelio es sometido a secado para detener el crecimiento del hongo y deshidratar el material.
7. Finalmente se tiene la etapa del post-procesamiento, que comprende procesos de recubrimientos o acople con otros materiales de acuerdo a la aplicación que tenga el material

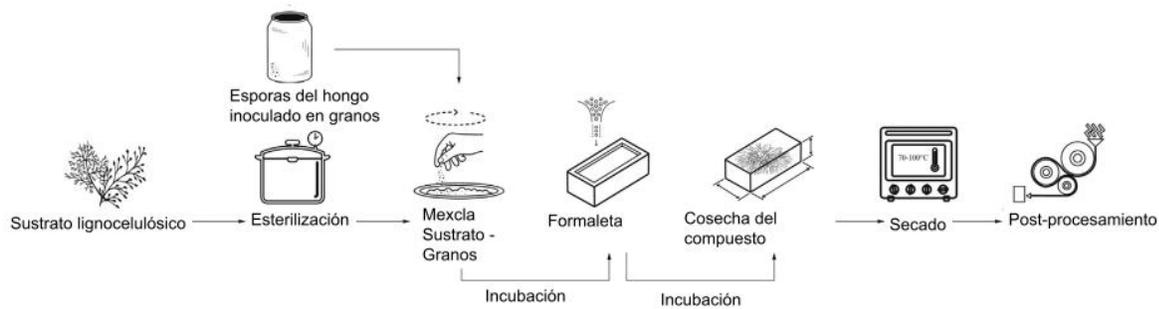


Figura 1-2 Esquema del método de producción de un biomaterial a base de micelio (Fuente: Adaptado de Elsacker et al., 2020)

Para desarrollar un material de micelio de acuerdo a la Figura 1-2, cada paso del proceso representa una variable y de acuerdo al material que se plantee desarrollar, estas variables deben estudiarse en detalle, ya que tienen un efecto en el comportamiento mecánico, químico, morfológico de la estructura del micelio. A continuación, se describen las variables y se expone los efectos en sus propiedades mecánicas.

1.4.1 Especie de hongo

El crecimiento del micelio, la morfología, pared celular y extensión de las hifas, el metabolismo, varía según la especie del hongo, por lo tanto, en el momento de desarrollar un material a base de micelio debe conocerse a profundidad la especie del hongo a utilizar (Haneef et al., 2017; Vanden, 2021).

Se ha identificado más de 27 especies de hongos distintos en el desarrollo de materiales a base de micelio, la mayoría pertenecen a la clase de los basidiomicetos, caracterizados por el crecimiento basidios, estructuras reproductivas donde almacenan las esporas dentro del fructífero (zetas), a su vez, estos hongos se encuentran dentro del orden *Agariclaes* (desarrollo de lámelos debajo del píleo o sombrero de la zeta) o del orden *Polipolares* (desarrollo de poros al interior de la zeta). Otra característica esencial que hace posible su utilización, es que pertenecen al grupo de saprofitos, que descomponen lignocelulosa o materia orgánica con el fin de absorber los nutrientes (Cerimi et al., 2019). En el grupo de las especies utilizadas se incluye *Ganoderma ludicum*, *Pleurotos ostreatus*, *Pleurotus djamor*, *Trametes versicolor*, *Fomes fomentarius*, *Schizophyllum commune*, *Agrocybe brasiliensi*, entre otras especies (Cerimi et al., 2019). Para ampliar la información en la **Tabla 1-1** se muestran los hongos que se han usado en las diferentes investigaciones.

Tabla 1-1 Especies de hongos mencionadas en patentes (Fuente: Cerimi et al., 2019)

Clase	Orden	Especie	Patentes otorgadas
Basidiomicetos	Agaricales	<i>Agrocybe aegerita</i>	3
		<i>Agrocybe brasiliensis</i>	1
		<i>Coprinus comatus</i>	3
		<i>Flammulina velutipes</i>	1
		<i>Hypholoma capnoides</i>	1
		<i>Hypholoma sublaterium</i>	1
		<i>Lentinula edodes</i>	3
		<i>Macrolepiota procera</i>	
		<i>Pleurotus djamor</i>	2
		<i>Pleurotus eryngii</i>	2
		<i>Pleurotus ostreatus</i>	4
		<i>Pleurotus ostreatus var. Columbines</i>	3
		Poliporales	<i>Fomes fomentarius</i>
	<i>Ganoderma tsugae</i>		2
	<i>Ganoderma lucidum</i>		5
	<i>Ganoderma orogenese</i>		5
	<i>Grifola frondosa</i>		2
	<i>Piptoporous betulina</i>		2
		<i>Polyporus mylittae</i>	
	<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	1	
	<i>Trametes versicolor</i>	2	
	Russulales	<i>Hericium erinaceus</i>	1
Ascomicetos	Pezizales	<i>Morchella angusticeps</i>	1
	Xilariales	<i>Xylaria polymorpha</i>	
		<i>Xylaria hypoxylon</i>	
		<i>Xylaria filiformis</i>	
		<i>Xylaria longipes</i>	

La constitución de cada hongo cuando crece en determinado sustrato, aporta características mecánicas y físicas al micelio. Por ejemplo, en un estudio donde usaron el hongo *Trametes versicolor*, la superficie del sustrato se generó una textura suave y flexible parecido al fomi, mientras que con el hongo *Pleurotus ostreatus* se generó una superficie rugosa y firme (Manan et al., 2021). Otras propiedades son variables como el módulo de elasticidad, rigidez, capacidad a flexión, afectadas por la especie de hongo y por el tipo de

sustrato. Se tiene mayor fuerza a tensión y capacidad a flexión del hongo *Trametes versicolor* en comparación con el hongo *Pleurotus ostreatus*, cuando crecen en paja o en cáñamo (Jones et al., 2020a).

1.4.2 Tipo de sustrato

El sustrato es el material sobre el que se va a desarrollar el micelio, cuando es inoculado, el hongo tendrá que competir selectivamente por los nutrientes con bacterias, y otros hongos presentes en el medio. El sustrato es apropiado para el crecimiento del micelio si contiene requerimientos nutritivos en cantidad suficiente para que sintetice sus metabolitos y tome de él la energía que requiere. Estos requerimientos pueden variar según los nutrientes presentes en determinado sustrato (Royse, 2017). Paja, aserrín, fibras de cáñamo, cascarilla de arroz, lana, residuos agroindustriales, astillas de madera, lino, fibras de algodón, de coco, entre otros sustratos orgánicos y lignocelulósicos son adecuados para el cultivo del micelio de los hongos saprofitos debido a los nutrientes que contienen (Manan et al., 2021). Al menos el 20% del peso seco del sustrato, debe ser fuente nutritiva para que el micelio pueda crecer; corresponden a azúcares simples (dextrosa, celulosa, maltosa), carbohidratos (maltodextrina, almidón) y lignina, se encuentran en madera blanda, que según la especie del árbol comprende aproximadamente un 40% de celulosa y 20% de hemicelulosa, las fibras de cáñamo, bagazo de caña, residuos orgánicos contienen almidón que también aportan nutrientes al hongo. Las fuentes de carbono que no aportan un alto valor nutricional son, por ejemplo, la cascarilla de arroz y de trigo, que contienen dióxido de sílice y poco almidón, respectivamente, y no favorecen al crecimiento de hongos basidiomicetos (Bayer & McIntyre, 2015).

Cuando se utiliza cascarilla de arroz como sustrato para el crecimiento del micelio, el compuesto adquiere propiedades para resistir el fuego, ya que la cascarilla de arroz contiene sílice y este componente ayuda formar una barrera que envuelve a las partículas de carbón en las que se convierte la quitina cuando el material es sometido al fuego. Esta barrera ayuda a que el material tenga menos pérdida de masa y en consecuencia la tasa liberación de calor y de gases como monóxido de carbono y dióxido de carbono sean bajos. La tasa de liberación de calor y el tiempo de descarga de liberación de gases son parámetros evaluados en materiales donde se realizan pruebas de reacción contra el fuego. Los materiales a base de micelio donde el sustrato contiene sílice, exhiben mejores capacidades en algunos los parámetros normativos para resistir el fuego, en comparación

con materiales de construcción convencionales como el fomi y tableros de partículas (Jones et al., 2018).

La influencia del tipo de sustrato en las propiedades mecánicas del material se evidencia en diferentes ensayos como en el de resistencia a tracción y a compresión. Cuando se utilizan fibras, la resistencia a la fuerza cortante es mayor en comparación al sustrato de aserrín, 5-7 MPa y 5.5 MPa respectivamente (Jones et al., 2020a). Sin embargo, el aserrín aporta resistencia ante una fuerza de compresión al aumentar la densidad del material y reducir los vacíos; en consecuencia, un material menos poroso y más resistente. La porosidad, es una característica que da lugar a un compuesto con fin aislante (térmico y acústico) ya que la presencia de vacíos disminuye la conductividad térmica y disipa las ondas de sonido, los sustratos que aumentan los vacíos son las pajas, fibras, astillas y virutas de madera, es decir, material que no tenga partículas de tamaño muy fino (Jones et al., 2020a).

Más allá de los tipos de sustratos, lo que tiene relevancia en el reforzamiento del material a base de micelio es el perfil nutricional del sustrato, porque son los nutrientes los que promueven el crecimiento y la unión, pues la falla ocurre en el aglutinante del micelio en lugar del relleno del sustrato (Jones et al., 2020a). Un ejemplo de lo anterior se evidencia cuando el micelio crece en sustratos ricos en azúcares, como dextrosa de papa, sintetizando el azúcar en lípidos o grasas que aumentan la elongación, es decir, favorece al módulo de elasticidad, pero no a la rigidez, contrario a el crecimiento del micelio en celulosa pura (fibra de madera) donde su absorción aumenta la rigidez. (Haneef et al., 2017).

En el momento de conformar el sustrato es posible realizar determinada mezcla de nutrientes para mejorar las características mecánicas del material, es decir, conformar capas de sustratos, por ejemplo, sustratos de baja densidad y baja elasticidad, como el algodón y fibras de coco, pueden utilizarse como capa externa para aumentar la tensión superficial y la capacidad a flexión, y en la capa interna del material, utilizar sustratos densos como aserrín, para proporcionar rigidez en el núcleo (Bayer & McIntyre, 2015).

La fuente directa de energía para el metabolismo, formación de diferentes partes y estructuras celulares de los hongos, es el carbono. Dada la importancia para la vida de la

célula, este elemento se requiere en mayores cantidades, proveniente de diferentes fuentes como polímeros, carbohidratos y lípidos (Royse, 2017).

En la Tabla 1-2, se muestra de acuerdo a la clase de hongo, las preferencias de degradación de la lignocelulosa.

Tabla 1-2 Degradación según la clase del hongo (Fuente: adaptada de Royse, 2017)

Clase de hongo (Orden)	Degradación
Ascomicetos y Basidiomicetos	Celulosa, hemicelulosa, ligeramente lignina
Basidiomicetos (Poliporales)	Celulosa, hemicelulosa
Basidiomicetos, Ascomicetos (Xilariales)	Celulosa, hemicelulosa, lignina

Al considerar la preferencia de degradación de la especie de hongo, se potencia el crecimiento del micelio, convirtiéndose en estrategia para conformar sustratos de alto valor nutricional, aportando fuentes fijas de azúcares y polímeros donde su absorción provoca efectos en las propiedades morfológicas, químicas y mecánicas del micelio. En la Tabla 1-3 se discrimina el porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina para diferentes residuos.

Tabla 1-3 Lignocelulosa en residuos agrícolas y forestales (Fuente: Royse, 2017)

Residuos	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Bagazo de caña	27-42	19-30	19-23
Rastrojo de maíz	36-40	25-29	13-21
Olote de maíz	28-45	35-43	11-17
Paja de arroz	23-38	18-29	6-18
Paja de trigo	32-40	21-29	6-15
Cascarilla de arroz	28-43	18-21	22-23
Residuos de pasto	25-40	13-38	6-18
Residuos de coco	21-36	12-23	41-48
Desechos de algodón	52-90	5-20	4-12
Cáscara de semilla de girasol	32-43	24-25	23-29
Pulpa de café	23-29	15-17	13-26
Madera de vid	34-61	17-21	20-23
Papel periódico	18-30	25-40	40-55
Desechos de papel	53-70	12-25	11-30
Cáscara de nuez	30-40	25-30	25-30

Cascarilla de avellana	25-38	21-25	30-35
Maderas blandas	38-50	11-35	25-35
Maderas duras	40-55	22-40	18-26

1.4.3 Método de esterilización

Se han empleado distintos métodos de esterilización del sustrato, como esterilización por temperatura, esterilización química o agentes microbianos.

La esterilización del sustrato por temperatura, se da por medio de un autoclave o por pasteurización. Cuando se realiza por medio de un autoclave, el tiempo de esterilización y la temperatura varía según el experimento. La temperatura puede estar en un rango de 115 y 121°C y el tiempo entre 15 y 28 minutos (Appels et al., 2018; Vanden, 2021). El método de pasteurización consiste en introducir el sustrato en agua hirviendo a 100 °C aproximadamente por 100 minutos (Vanden, 2021).

La esterilización del sustrato con sustancias químicas, consiste en utilizar una solución de peróxido de hidrogeno cuyas concentraciones depende de la cantidad de sustrato, 0.3 - 10%. El cultivo de bacterias como *Streptomyces alboniger*, *Streptomyces natalensis* y *Bacillus subtilism*, puede evitar el crecimiento de organismos indeseados dentro del sustrato, ya que la excreción de componentes antimicrobianos puede reducir la competencia entre bacterias y el hongo seleccionado (Vanden, 2021). Otra alternativa para evitar que el micelio se infecte, es modificar genéticamente el hongo para que supere los microorganismos que crezcan en el sustrato (Vanden, 2021).

El efecto de la esterilización en el compuesto de micelio no es muy significativo en las propiedades mecánicas del biomaterial, sin embargo, cuando un tipo de sustrato como paja, o fibras es esterilizado en autoclave, al someterse a una presión alta, las fibras pueden desfibrilarse generado un aumento en la elasticidad. El calor facilita el rompimiento de la pared celular de los desechos de madera y debilita los componentes químicos como la lignina y hemicelulosa, generando fácil absorción y una taza colonización más rápida. (Vanden, 2021).

1.4.4 Método de inoculación

Varios métodos de inoculación son aplicados, por ejemplo, inoculación en agar, en medio líquido y en “*Spawn*”, medio sólido. Cuando se realiza en agar, el medio de cultivo es preparado con azúcares para favorecer el crecimiento del hongo, puede inocularse las esporas o una pequeña fracción del fructífero. Una vez el crecimiento coloniza completamente el plato del agar, este puede ser cortado en pequeñas piezas e inocularse directamente en el sustrato.

Cuando se obtiene el micelio en granos “*Spawn*”, este es derivado de una inoculación previa, desde agar o una inoculación directamente con esporas en diferentes tipos de granos, semillas de maíz, avena, trigo, etc. (Stamets, 1993). En la medida que colonice todo el volumen de granos, se realiza una nueva inoculación dentro del sustrato. La cantidad estimada para la inoculación de las “semillas colonizadas” en el sustrato es entre el 10 y 20% del peso del sustrato.(Elsacker et al., 2020; Vanden, 2021). Para estimular y fortalecer el crecimiento de las hifas, el sustrato inoculado puede ser removido durante el crecimiento, generando hifas más robustas (Vanden, 2021).

El método de inoculación desde un medio líquido, consiste en obtener las esporas directamente del hongo e introducirlas en agua esterilizada, luego puede inocularse en granos, en otro medio líquido o en el sustrato (Stamets, 1993). Investigaciones han encontrado que las propiedades mecánicas de los materiales a base de micelio inoculadas con medio líquido son mejores comparados con las que se obtienen de inoculaciones en granos. Se genera mejor estabilidad dimensional en el crecimiento, es decir, segmentos colonizados más grandes, el módulo de Young y la resistencia a compresión también son mayores. Se cree que lo anterior es consecuencia de una colonización homogénea debido a una distribución uniforme desde el centro hasta la periferia del sustrato (Vanden, 2021).

1.4.5 Tipo de fermentación

Existen diferentes tecnologías de fermentación para el cultivo del micelio. Uno de los métodos, desarrolla el compuesto de micelio en contacto directo con el sustrato, en condiciones de humedad entre 70-90% y temperatura entre 15°C y 25°C, donde el hongo a través de secreción de enzimas degrada el sustrato, absorbe los nutrientes y en consecuencia aglomera las partículas. Este tipo de fermentación genera compuestos sólidos y livianos, que adoptan la forma del recipiente donde crece el micelio; materiales

que tienen aplicación en la industria de empaques, en la construcción, como alternativa al uso del poliestireno expandido (Manan et al., 2021).

Otro tipo de fermentación utilizada en la producción de materiales a base de micelio, consiste en el crecer el micelio fuera del sustrato, es decir, el crecimiento de las hifas es de forma aérea. Para desarrollar este crecimiento es necesario tener condiciones ambientales con altos niveles de CO₂, temperatura entre 30°C y 35°C para suprimir la fructificación, el sustrato debe ser rico en nutrientes y el contenedor no debe tener flujo de aire, sino un espacio vacío para generar un gradiente de CO₂. Este gradiente hace que el micelio promueva su crecimiento hacia el espacio vacío donde hay menos concentración de CO₂ buscando un ambiente con oxígeno y solutos, produciendo una estructura de micelio puro. El micelio puro es una especie de espuma, semejante al fomi, que puede ser cultivada con diferentes densidades, para ser utilizada en la producción de paneles acústicos y térmicos (Pelletier et al., 2019; Vandelook et al., 2021).

1.4.6 Procesos durante el empaque o formado

Durante el proceso de empaque o formado, el material adquiere propiedades distintas, si se manipula, por ejemplo, al ejercer presión cuando se empaca. Dichos procesos, tienen efecto en la densidad del material, rigidez, capacidad a compresión, módulo de elasticidad. Cuando el material se compacta durante el formado, los vacíos entre las partículas se reducen aumentando la densidad. La variación de esta propiedad tiene importancia en la construcción de materiales que funcionan como aislantes térmicos, a mayor porosidad, menor densidad y menor será el coeficiente de conductividad térmica. Para materiales rígidos, la compactación es favorable ya que al aumentar la densidad aumenta la resistencia a la compresión (Vanden, 2021).

Cuando el material crece en contacto con el molde se forman fragmentos de micelio, debido a que las hifas están buscando oxígeno, por lo tanto, crece de forma heterogénea. Para homogenizar el crecimiento, se desmonta el material de la formaleta permitiendo una colonización uniforme (Vanden, 2021).

Para un crecimiento uniforme del micelio desde el punto de vista del empaque, debe generarse el flujo del aire dentro del material, para garantizar mayor aglomeración, lo que da lugar a un aumento en la rigidez del compuesto (Kaplan-Bie et al., 2019).

1.4.7 Condiciones ambientales y tiempo de cultivo

Para favorecer el crecimiento del micelio dentro del sustrato, las condiciones ambientales del lugar de cultivo deben ser las siguientes: temperatura entre 21 y 30°C, humedad relativa entre 70-100% y debe existir intercambio gaseoso. Es importante mencionar que las especificaciones ambientales están sujetas a la especie del hongo, sin embargo, estas condiciones son comunes en diferentes estudios, donde se trabaja con hongos basidiomicetos y han sido recopiladas en pro de estandarizar un método de cultivo (Ross, 2016; Vanden, 2021).

Otras condiciones necesarias para el crecimiento del micelio, son la humedad dentro del sustrato, el pH y las concentraciones de CO₂. Algunos estudios indican que el contenido de humedad del sustrato debe ser superior al 60%, por lo tanto, la proporción de agua es de 2/3 y la del sustrato de 1/3. Con un porcentaje de humedad alto, aumenta la concentración de CO₂ lo que impide el crecimiento de fructífero (Ross, 2016). El pH debe estar entre un rango de 5 y 8 (Vanden, 2021).

El tiempo de cultivo varía según las dimensiones del material, además, para diferentes propiedades del compuesto, el tiempo de cultivo también cambia. Por ejemplo, en un periodo de 25 días, el material adquiere buena estabilidad térmica cuando es sometido a altas temperaturas, la absorción de calor se retrasa hasta llegar a una temperatura de 360°C (Vanden, 2021). También se tienen periodos de crecimiento de 5, 14, 20, 42 días, donde la resistencia a compresión se ve afectada por esta variable. Cuando el micelio crece en un periodo de 42 días, presenta mayor capacidad, sin embargo, resulta un efecto contrario en el módulo de elasticidad. Lo anterior responde a un aumento en la densidad, debido a que el micelio continúa creciendo, rellenando los vacíos y generando una red más fuerte (Vanden, 2021)..

1.4.8 Método de secado

Los métodos de secado varían desde el secado en horno microondas, secado por convección, infra rojo, secadores solares, lámpara de calefacción, horno calentador, prensa térmica, máquina secadora y secado al aire. El tiempo de secado también cambia de acuerdo a la temperatura inducida; a temperaturas altas el tiempo de secado es corto, 250°C – 20 minutos en prensa, 125 °C en horno – 2 horas, 220°C – 2 horas en secado por convección. El objetivo del secado es detener el crecimiento del hongo y disminuir el

contenido de humedad. Las propiedades como el módulo de elasticidad y la conductividad térmica de los materiales a base micelio, se ven afectadas por la pérdida de humedad, es decir, cuando el material tiene humedad la conductividad térmica es mejor en contraste con un material absolutamente seco, mientras que el módulo de elasticidad aumenta cuando el material se somete a secado (Vanden, 2021).

1.4.9 Post-procesamiento

El post procesamiento consiste en el mejoramiento del material una vez es cultivado y secado, por lo tanto, existen varios métodos donde aplican recubrimientos para proteger, mejorar la resistencia, impermeabilizar y darle un acabado estético al compuesto. En investigaciones, los recubrimientos que se han usado son aceites y resinas naturales, gomas como Carragenina, Quitosano y Xantano que forman una barrera física contra el agua y poseen componentes antimicrobianos. Otras mezclas, como proteínas de gluten de trigo, Zéina de maíz, insolubles en agua, han sido desarrolladas como barreras contra la humedad en los desarrollos del cuero a base de micelio (Vanden, 2021).

Otro tipo de post procesamiento que puede ser útil en la creación de tableros, consiste en comprimir usando una prensa de calor al compuesto que resulta de cultivar micelio puro, para crear placas con diferentes densidades con aplicaciones en andamios para órganos biomédicos, carne vegana, espuma para ropa y zapatos y tableros acústicos (Pelletier et al., 2019).

El post procesamiento depende de la aplicabilidad del compuesto de micelio, para mejorar sus capacidades mecánicas, utilizar recubrimientos que ayuden a aumentar la resistencia, comprimir el material para aumentar la densidad, utilizar aditivos que impermeabilicen, también puede articularse con otros materiales para potenciar su función, como por ejemplo placas de corcho, cartón, etc. que puedan sustituir parte de materiales convencionales y así implementarse el micelio como opción sustentable (Manan et al., 2021; Pelletier et al., 2019).

2. Capítulo 2: ¿Qué se ha logrado con el micelio?

El potencial de los materiales desarrollados a base de micelio se presenta desde una perspectiva comercial y científica como resultado de esfuerzos por migrar hacia materiales provenientes de procesos naturales que inspiren e integren saberes de diferentes disciplinas como la del diseño y arte, la ingeniería, la arquitectura, la medicina, la biología, etc. donde la comprensión de estos procesos se convierte en la guía para la formación de compuestos innovadores que paulatinamente desplacen el uso de materiales no biodegradables (Jones et al., 2020a; Nai & Meyer, 2016; Xing et al., 2018).

En literatura académica se evidencia información del desarrollo de materiales a base de micelio que reportan caracterizaciones químicas y mecánicas, diseños de elementos arquitectónicos, elaboraciones artísticas, entre otros. Existe un amplio rango de aplicaciones donde el micelio es usado como aglomerante, donde cada variable en su producción abre un camino de investigación hacia el futuro de los materiales formados por organismos vivos, que ayudan a combatir la crisis ambiental e imparte conciencia de que su desarrollo y aplicación es viable.

Como se observa en la Figura 2-1, la capacidad del reino fúngico es inconmensurable, tratarla de entender y aplicar parte de su función en los horizontes en los que se desarrolla la vida, es un acto revolucionario. Restauración de bosques, filtración de agua, pesticidas, aprovechamiento de desechos orgánicos, medicina, sostenibilidad ambiental, construcción, arquitectura, alimentación, etc. Campos que los que la materia prima puede ser repensada en pro de los beneficios ambientales (Ahmadi, 2016; Staments, 2005). Además, puede incorporarse en la economía circular, donde los materiales son desarrollados de principio a fin, es decir, se controla en términos ecológicos su procedencia, producción, puesta en marcha y degradación o reúso al final de su vida útil (Brosse, 2021).

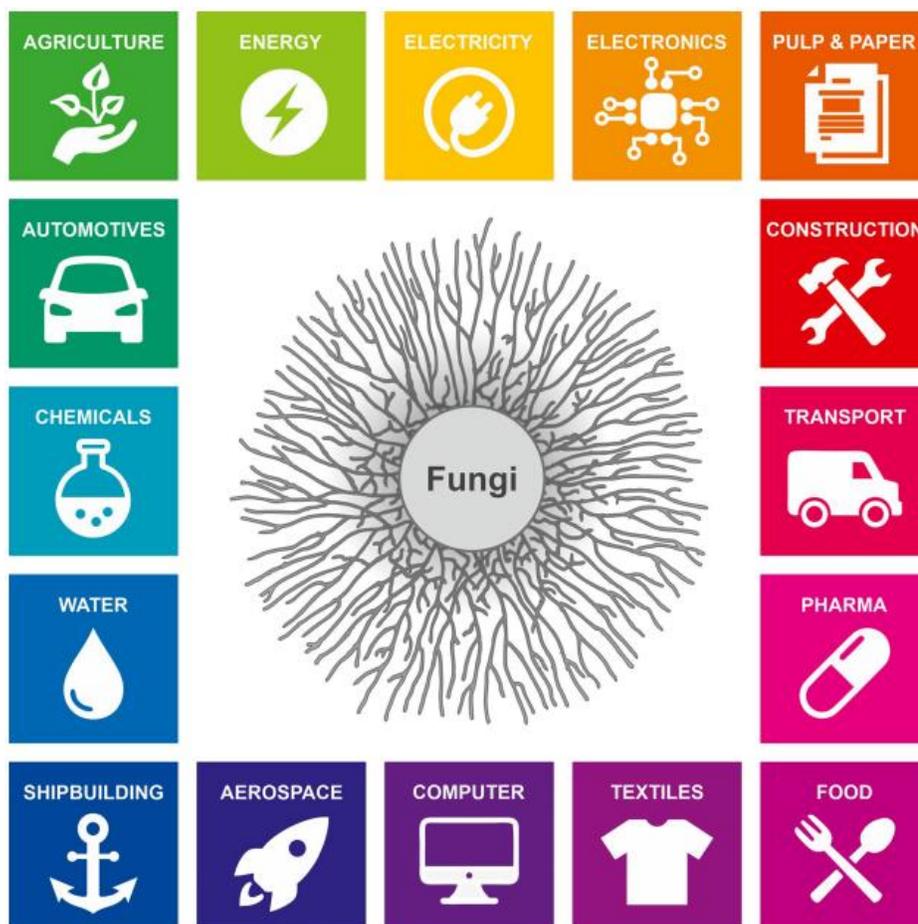


Figura 2-1 Capacidad reino fúngico en la industria (Fuente: Meyer et al., 2020)

2.1 Proyectos experimentales de compuestos a base de micelio

Existen proyectos y compañías que han mostrado avances importantes de materiales compuestos a base de micelio, apostándole a un cambio de paradigma por crear biomateriales que se generen a sí mismos como sistemas vivos. Estos materiales tienen la capacidad de regenerarse, ser biodegradables, de fácil ensamblaje, de bajo costo y de bajo consumo energético (Jones et al., 2020a). El micelio se ha desarrollado en forma de cuero, para sistemas de empaques, para aislantes térmicos, acústicos, para la industria de la moda, automotriz, ladrillos, paneles, que han demostrado un impacto positivo en su aplicación (Vandelook et al., 2021). En la Tabla 2-1 se muestra un resumen de la exploración de algunas compañías y los productos a base de micelio, como evidencia de transición hacia el cambio de paradigma, creando materiales renovables.

Tabla 2-1 Ejemplos de empresas comercializadores de productos a base de micelio (Fuente: Elaboración propia)

Compañía	País	Productos	Referencia
Ecovative	Estados Unidos	Alimento, textiles, cosmética, empaques, Espuma-fomi	(Ecovative, 2023)
Mycoworks	Estados Unidos	Cuero	(MycoWorks, 2023)
MycoTEX	Países Bajos	Textiles	(Mycotex, 2023)
Mogu	Italia	Paneles, Cuero	(Mogu, 2022)
Officina Corpuscoli	Países Bajos	Productos artísticos	(Officina Corpuscoli, 2023)
BioHM	Reino Unido	Paneles aislantes	(BIOHM The Future Of Home London, 2023)
Magical Mushroom	Reino Unido	Empaques	(Magical Mushroom Company, 2023)
MycoHAB	Namibia	Bloques	(MycoHAB, 2023)
Bolt Threads	Estados Unidos - Holanda	Cuero	(Best Made Company LLC, 2023)
Mylo	Estados Unidos - Holanda	Cuero	(Meet MyloTM, 2023)

2.1.1 Proyección artística

En la exposición artística realizada por *Fungal Futures*, en asociación con Officina Corpuscoli, se rompe la delgada línea que hay entre el arte y la ciencia, donde diseñadores e investigadores trabajan mano a mano para entender a la naturaleza como parte de todo, explorando nuevas ideas generando conocimiento y experiencias, racionales y

emocionales (Nai & Meyer, 2016). El trabajo evoca a pensadores del pasado que contribuyeron significativamente al avance de la ciencia y el arte, como Leonardo da Vinci, que combinó estos dos saberes, siendo escultor, dibujante, matemático, donde su trabajo artístico era el resultado de sus investigaciones. Bajo esta interacción entre lo humano y la naturaleza, se concibió el proyecto *Fungal Futures*, donde un grupo de diseñadores y artistas, desarrollaron materiales, aplicaciones y narrativas a partir del micelio. Otro ejemplo, es la exhibición de la artista Aniela Hoytink, que desarrolla el micelio para usarlo como prenda de vestir, creó mallas decorativas y delicadas, formando un textil dinámico y modular que podía ser reconstruido según la necesidad. Para este proyecto no se generaron residuos en su producción y el material fue completamente degradable (Nai & Meyer, 2016).

Mauricio Montalti, de la Officina Corpuscoli, explora la capacidad descomponedora del hongo *Phanerochaete chrysosporium*, capaz de degradar plástico, usando una silla plástica tapizada con micelio como símbolo a la crítica por la cantidad de desechos que el sistema económico actual genera. El proyecto es titulado “*Infusing life with fungi to trigger a process of final dissolution*” (Nai & Meyer, 2016).

La Officina Corpuscoli es otro referente de un espacio de investigación y creación transdisciplinario. Desde una percepción holística de la vida, explora y cuestiona los estigmas culturales, para crear materiales que reflejen la cultura contemporánea, basados en biotecnología, antropología, biodiversidad y de cómo el hombre impacta en estos campos, cómo es la interacción con lo no humano, para desarrollar tecnologías a base micelio y diseñar productos para diferentes proyecciones artísticas (Officina Corpuscoli, 2023).

2.1.2 Material para construcción

La Torre Hy-Fi, mostrada en la Figura 2-2, es una referencia que habla de la posibilidad de producir materiales a base de micelio empleados en la industria de la construcción. La torre de 12 m de altura, es construida completamente con materiales reciclables, donde se fabricaron 10000 ladrillos orgánicos, compuestos por tallos de maíz como sustrato para el crecimiento del micelio del hongo *Trametes versicolor*. La torre es una apertura para la arquitectura sustentable, rompe con los paradigmas convencionales en términos de materiales, porque plantea la continuación del ciclo de carbono; a partir de bloques

desarrollados con micelio, que regresan a la tierra en forma de compostaje al final de su ciclo de vida. Este proyecto es producto de tecnologías biológicas combinadas con avances computacionales y de ingeniería para crear nuevos materiales de construcción. Este proyecto se colaboró con la empresa Arup, para estudios estructurales, donde los ladrillos fueron sometidos a pruebas de resistencia para determinar su permanencia a una altura de 12 metros. La forma de la estructura completa tiene un ancho de base lo suficientemente robusto para soportar ráfagas de viento de 105 km/h (Holcim Foundation: Sustainable Construction, 2015). Se evidenció que los ladrillos tuvieron propiedades mecánicas adecuadas para levantar la torre y permanecer durante todo el tiempo de exposición.

Los ladrillos se sometieron a test de envejecimiento, donde simularon tres años de exposición al viento y al agua, equivalente a tres semanas en una cámara climática que simula ciclos de lluvia, viento, cambios de temperatura. El resultado fue positivo, ya que los bloques soportaron las condiciones y se conservaron íntegros (Holcim Foundation: Sustainable Construction, 2015).

Otro proyecto que merece ser evidenciado entre los antecedentes de materiales a base de micelio en la construcción, son los bloques que creados por MycoHab en colaboración con el MIT, Standar Bank y Redhouse Studio, donde aprovechan el arbusto invasor *Acacia Mellifera*, (principal causante de problemas en el ecosistema del país africano Namibia, debido a su excesiva invasión homogenizando la flora), como sustrato para el crecimiento del micelio del hongo de la familia del *Pleurotus*, aportando a la reducción de la escasez de alimento y vivienda en este país. Para el desarrollo de los bloques, se toma como guía la construcción de aglomerados y contrachapados, mediante un proceso similar al de compactación en caliente para formar paneles, se obtienen bloques resistentes que cumplen funciones estructurales, simultáneamente se convierten en un aislante térmico y tiene la capacidad de absorber CO₂ (Architizer Journal, 2023).

El desarrollo de materiales a base de micelio ha incrementado con los años gracias a las bondades que se evidencian en estos compuestos, por ejemplo, la patente creada por Philip Ross (Ross, 2016), pionero en el cultivo del micelio como material renovable, diseña una estructura fuerte de bloques de micelio, a partir de desechos agroindustriales, donde

crea un modelo de producción, con diferentes moldes para el crecimiento, proporciona refuerzo estructural con elementos de bambú dentro del molde para generar resistencia a la flexión, durante el crecimiento interviene el proceso, realizando compactaciones para homogenizar y dar resistencia al compuesto. El resultado es una estructura resistente al agua, al fuego, que funciona como aislante, invención concebida para el mundo del arte.

2.1.3 Empaques – Cuero - Espuma

La compañía estadounidense Ecovative, pionera en desarrollar diversos productos con micelio, ofrece ejemplos del potencial de este material. Desde su ideología como empresa, donde el objetivo es diseñar elementos que estén en armonía con el planeta, desarrolla tecnología a través de la investigación de los sistemas naturales, especialmente, la interacción del reino fúngico con el ecosistema como organismo que ayuda a mantener al mundo vivo. Estas tecnologías son nombradas como Mycocomposite que utiliza las fibras del micelio para unir sustratos orgánicos para formar empaques y materiales de construcción ecológicos y la tecnología AirMycelium, donde emplean granjas verticales, que son cámaras acondicionadas para cultivar micelio puro a gran escala y producir alternativas que pueden sustituir al cuero, plástico y otros materiales provenientes de combustibles fósiles (Ecovative, 2023).

El micelio puro, es semejante a una especie de espuma densa, resultado de la técnica de fermentación donde las hifas crecen fuera del sustrato, dependiendo de la especie del hongo y de las condiciones ambientales donde se encuentre. Esta forma de crecimiento se da gracias a dos funciones, la primera es la acumulación de CO₂ dentro del sustrato, que es inducido por la respiración celular de las hifas y una vez se aumenta el gradiente de CO₂, el micelio, para alcanzar un ambiente más adecuado sale al exterior. La segunda función tiene que ver con el estímulo que se genera por la producción de microgotas de solutos, compuestas por proteínas, minerales o carbohidratos, que aumentan el potencial osmótico para generar humedad fuera del sustrato, determinando una guía para el crecimiento del tejido del micelio (Vandelook et al., 2021).

Los materiales de micelio puro son una propuesta promisoría en el campo de la industria textil, dado que su fermentación y post-procesamiento, permiten mejorar propiedades mecánicas como la elasticidad y la resistencia, dentro del rango de materiales como fomi, cuero, papel y plástico, para generar el compuesto a escala de mercado. Esta es la característica común de compañías emergentes como Mycoflex, Mylo, Reishi, Mylea, que

producen un textil semejante al cuero, utilizando metodologías de producción como fermentación líquida realizada en biorreactor y fermentación en estado sólido, bandejas con sustrato; donde el micelio crece fuera del él. Las condiciones para la fermentación en estado sólido corresponden a una temperatura aproximada de 30°C, humedad relativa entre el 40-90%, y concentración de CO₂ entre 50-70k ppm, dentro de una cámara que permita controlar estas condiciones óptimas para que se desarrolle únicamente el micelio y no el fructífero (Vandelook et al., 2021).

Adicional a la forma en el que se produce el micelio para producir un compuesto que sustituye al cuero y al fomi, se tienen tratamientos químicos y modificaciones genéticas con el fin de reforzar sus capacidades mecánicas como la elasticidad y aumentar la durabilidad del material (Vandelook et al., 2021).

2.1.4 Material aislante

Se desarrolla el micelio como aislante térmico para un proyecto llamado, Mushroom Tiny House, cultivando el hongo en residuos agroindustriales como tallos de maíz. Su construcción consiste en crecer el micelio del hongo Shitake dentro de formaletas de madera, en forma de sándwich, donde el micelio al interior crea un sello hermético, luego se realiza un proceso de curado, dejándolo secar por varios días para obtener una pared fuertemente sellada. Este material es una muestra de una construcción ecológica de bajo costo, utilizando aislantes naturales que cumplen la misma función de un aislante a base de petróleo. (Ecovative, 2013)

2.1.5 Diseños arquitectónicos – Paneles acústicos

Mogu, compañía italiana, es oficialmente una comercializadora de productos a base de micelio, basándose en la inteligencia de la naturaleza para radicalmente romper con los diseños cotidianos, buscando un balance entre materialidad y ecología, fabrican diversos productos, entre ellos paneles acústicos de diferentes tamaños y formas, con buen comportamiento para absorber frecuencias de ruido que se generan en oficinas, cafés, salas. Los paneles asemejan la estructura de un fomi, pero con gran valor ambiental, ya que reúsan los desechos agrícolas que no tienen lugar en la industria, convirtiéndolos en materia prima para el sustrato del micelio (Mogu, 2022).

En la Figura 2-2 se evidencia distintos tipos de materiales a base de micelio desde diferentes campos, arquitectónico, artístico, textil, embalaje y construcción.

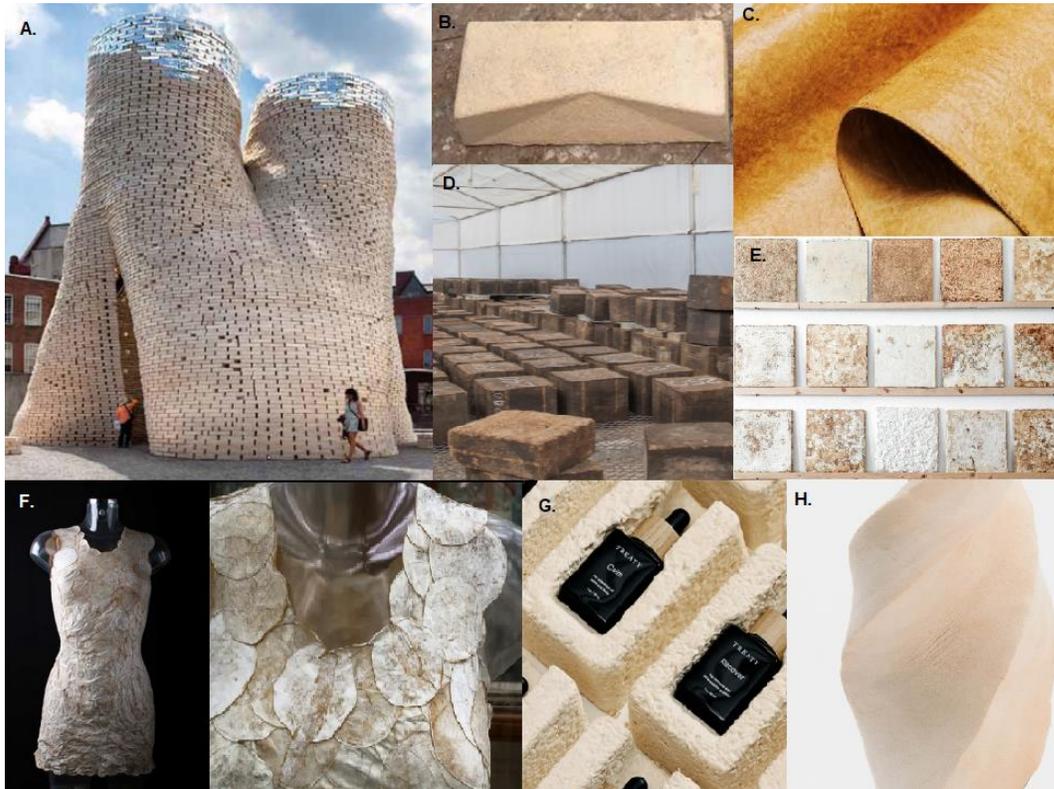


Figura 2-2 Materiales a base de Micelio: A. Torre Hy-fi. B. Ladrillo de Torre Hy-fi. C. Cuero. Mycoworks. D. Bloques. MycoHAB. E. Paneles acústicos. Mogu. F. Vestido. Aniela Hoitink - Fungal Futures. G. Empaques. Ecovative. H. Espuma. Ecovative (Fuente: A-B.Holcim Fundation: Sustainable Construction, 2015. C.Mycoworks, 2023. D. MycoHAB, 2023. E.Mogu, 2022. F.Nai & Meyer, 2016. G-H.Ecovative, 2023)

2.2 Propiedades de los materiales a base de micelio desde la perspectiva investigativa

Son diversos y están en aumento los reportes de investigación que presentan el comportamiento de materiales a base de micelio, donde revelan las propiedades mecánicas específicas para abrir caminos de investigación. Autores como (Xing et al., 2018) desarrollaron un material compuesto de micelio como aislante térmico, donde tres especies de hongos basidiomicetos, *Oxyporus latermarginatu*, *Megasporoporia minor* y *Ganoderma resinaceum*, fueron seleccionados para colonizar rápidamente un sustrato

lignocelulósico, aislados directamente de árboles, para ser cultivados en residuos de paja. Los materiales con propiedades aislantes se caracterizan por tener valores bajos en la constante de conductividad térmica k y valores altos en el calor específico. El poliestireno expandido, por ejemplo, tienen valores de k entre (0.029 - 0.039 W/mK), parámetro relacionado con la densidad (28–45 kg/m³) (Xing et al., 2018). En la investigación, el resultado de las mediciones de los parámetros térmicos en los bloques de micelio de las tres especies, se encuentran en el rango para conductividad térmica de 0.074-0.087 W/mK, y calor específico entre 0.418 – 0.369 MJ/m³k. Valores bajos en la conductividad, acordes con los materiales con propiedades aislantes. Dentro de la investigación se compara con biomateriales compuestos por resinas y fibras naturales, cuya conductividad térmica k , se encuentra entre 0.09179 y 0.1534 W/mK, determinando que los bloques a base de micelio tienen mejor comportamiento que otros biomateriales (Xing et al., 2018).

El estudio evidencia que tener cultivos de diferentes especies, no representa una variable significativa en la evaluación de los parámetros térmicos, sin embargo, la homogeneidad del material conformado es influenciado por el crecimiento del micelio que varía según la especie, afectando directamente la densidad. (Appels et al., 2019). Sin embargo, la preparación de la matriz del sustrato, el material, el proceso de formación del compuesto, genera cambios en la densidad y en consecuencia, efectos en la conducción térmica. (Xing et al., 2018).

Otros parámetros como la geomorfología, densidad, absorción de agua, propiedades fisicomecánicas son evaluados por Appels et al (2019), donde cultivan dos hongos (*Pleurotus ostreatus* y *Trametes multicolor*), en tres tipos de sustratos, algodón, paja y aserrín, aplicando tres técnicas de producción, prensado en frío, no prensado y prensado en caliente, para conformar un compuesto. El tipo de hongo impacta en el nivel de colonización y en el espesor de la piel del micelio, es decir, del micelio puro. El sustrato presentó efecto en el espesor y en las propiedades mecánicas del material compuesto. Cuando se desarrolla el micelio puro y no es prensado, el material tiene una apariencia de fomi y su densidad aumenta cuando crece en aserrín, la capacidad a flexión aumenta, debido a las propiedades elásticas. Cuando el material es prensado, la densidad disminuye y su capacidad a flexión y elasticidad son semejantes a los materiales naturales como el corcho. En general la mejor capacidad a flexión, se evidencia primero en los tratamientos

no prensado, y luego en los materiales prensados en frío y prensados en caliente (Appels et al., 2019).

El análisis de expansión de los materiales a base de micelio, toma importancia en la aplicación como aislante en la industria de la construcción, debido a que su instalación en forma de sándwich, por lo tanto, el interior donde se introduce el material aislante debe tener un espesor constante (Appels et al., 2019)

Otra de las variables que influye en las propiedades físico-mecánicas de los materiales a base de micelio, es el sustrato, en el estudio realizado por Haneef et al (2017) se evaluó la morfología de acuerdo a la caracterización química del crecimiento del micelio cuando crece en dos sustratos distintos, celulosa de madera y caldo de dextrosa de papa. Se evidencia que un medio de cultivo alto en azúcares genera propiedades elásticas y alta ductilidad, mientras que la celulosa, da lugar a un compuesto rígido con menor flexibilidad.

Las condiciones de cultivo, pueden ser de gran relevancia en las propiedades de un compuesto de micelio (Appels et al., 2018). Se evaluaron las propiedades mecánicas del material a base del micelio del hongo *Schizophyllum commune*, comparado en su estado natural y modificado genéticamente al suspender el gen hidrofóbico SC3. En las condiciones del cultivo se controló la iluminación, observando el crecimiento en oscuridad y expuesto a la luz, bajo concentraciones altas y bajas de CO₂ 400 y 70000 ppm, respectivamente. Los resultados muestran que la suspensión del gen hidrofóbico en el hongo, bajo altas y bajas concentraciones de CO₂ en oscuridad y altas y bajas concentraciones de CO₂ en la luz, aumenta el módulo de elasticidad y el esfuerzo a tensión, en comparación con el hongo en estado natural, debido a los cambios en la densidad como consecuencia de la inactivación del gen en la pared celular de la hifa, causa que el compuesto retenga más humedad. La modificación genética de la proteína hidrofóbica evidencia mejora en las propiedades mecánicas del biomaterial generando características termoplásticas que pueden ayudar en la sustitución de materiales provenientes del petróleo.

En el estudio realizado por Pelletier et al (2019) se desarrolla el micelio puro, es decir, micelio separado del sustrato, en una cámara diseñada para mantener la temperatura entre 30°C y 35°C, un nivel alto de CO₂, inhibir el crecimiento del fructífero y promover el crecimiento del micelio a un espacio vacío que presenta concentraciones bajas de dióxido de carbono. El resultado es una espuma libre de sustrato, polímero absolutamente natural

que queda encima del sustrato, y luego es cortado, finalmente se obtiene Mycelium Foam Board (MFB). El sustrato está compuesto por 56.3% granos de maíz, 2.4% maltodextrina, 0.8% sulfato de calcio y 13.5% minerales y nutrientes, las “semillas” de hongo del género *Ganoderma*, representa un 27%. Este biopolímero es conformado en muestras con diferentes densidades para evaluar su capacidad acústica, a través de un tubo de impedancia, conocido como tubo de Kundt, por lo tanto, se mide la onda de sonido una vez atraviesa el material, para determinar las propiedades acústicas del material.

Las muestras son comparadas con 4 materiales de absorción acústica que se utilizan en la industria de la construcción, como el corcho, algodón, fieltro y celdas acústicas de techo. El resultado es favorable ya que el MFB tiene mejores capacidades que las celdas acústicas de techo y puede absorber frecuencias de sonido entre 350 Hz hasta 4 kHz, frecuencia baja-media, equivalente a impedir el sonido de las carreteras o de construcciones (Pelletier et al., 2019).

También se tiene investigación sobre la capacidad que tiene un material a base de micelio, para resistir el fuego (Jones et al., 2018). En este caso, se cultiva el micelio en dos sustratos ricos en sílice, como la cascarilla de arroz y vidrio molido, a pesar de que no tiene un alto valor nutricional, por lo que el micelio toma más tiempo en crecer y las hifas presentan baja densidad, proporciona buen comportamiento cuando el material es sometido al fuego. Los parámetros como la tasa de liberación de calor, tiempo del “flashover” (tiempo que toma en propagarse el fuego de manera súbita en un cuarto cerrado) y la emisión de gases, parámetros importantes en los estudios de reacción contra el fuego, debido a que tienen un rol esencial en la propagación, presentan valores mejores que los materiales sintéticos. Lo anterior demuestra que un material a base de micelio, es una alternativa para sustituir materiales provenientes de combustibles fósiles usados para resistir el fuego.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede notar un interés comercial y académico por investigar e implementar el micelio como biomaterial para diversas aplicaciones, desde producciones artísticas hasta elementos para la construcción. Los materiales a base de micelio, son materiales innovadores por su bajo consumo energético, bajo costo en su producción y sobre todo por el inmenso beneficio ambiental que aportan al ser biodegradables y al integrar materiales de bajo valor económico como son los desechos

agroindustriales que, a partir de una metodología de cultivo con condiciones operacionales específicas, puede crearse materiales significativos como empaques, aislantes, espumas, entre otros, potenciales en sustituir parcial o completamente a los materiales sintéticos, inclusive pueden desarrollarse materiales semejantes al cuero, materiales con capacidad para resistir el fuego, proporcionar aislamiento térmico y acústico, alentando los intentos por reducir la problemática ambiental, consecuencia de la demanda alimenticia, de vivienda, de energía, etc., al aumentar la población. Sin embargo, hay factores que limitan su uso, como su rendimiento mecánico, durabilidad, absorción de agua y también la brecha entre investigaciones que divulgan de manera fragmentada, o incompleta la información del desarrollo del material (Attias et al., 2020). Por lo tanto, es necesario continuar con investigaciones, desde cualquiera de las variables que comprende su desarrollo, como el tipo de hongo, el sustrato, condiciones de incubación, post procesamiento, forma de fermentación, tipo de inoculación, entre otras, que den lugar a un mejoramiento en su comportamiento físico, químico de un determinado uso. Es importante estudiar a profundidad la biología del hongo, su estructura micelial, la composición de la pared celular de las hifas, que juega un papel fundamental en su estructura y comportamiento, pues entender su morfología ayuda a desarrollar materiales con características físico-mecánicas más óptimas. Los materiales a base de micelio, también pueden proyectarse interactuando con otros materiales, por ejemplo, acoplarlo con corcho para potenciar su efecto como aislante acústico, instalarlo en forma de sándwich como sistema de protección, recubrirlo con productos orgánicos para aumentar su durabilidad, intervenirlo genéticamente para disminuir su absorción de agua y aumentar su capacidad mecánica, en conclusión, profundizar la investigación para evolucionar el desarrollo de estos biomateriales y revolucionar el mundo de los materiales convencionales (Appels et al., 2018; Jones et al., 2020b; Pelletier et al., 2019).

2.3 Potencial ambiental de materiales a base de micelio

Como se ha mencionado, el micelio tiene potencial para convertirse en alternativa que puede sustituir materiales como el cuero, el fomi, el poliestireno expandido, fibra de vidrio, y de acuerdo a la funcionalidad y desarrollo puede llegar a ser viable en una producción a gran escala, evitando la extracción de materiales primarios, lo que aporta una ventaja ambiental considerable al reutilizar desechos agroindustriales y forestales. Sin embargo, para comprobar tal aporte o su bajo impacto ambiental, es necesario realizar un análisis

de ciclo de vida, donde se cuantifique su consumo energético en términos de emisiones, consumo derivado del proceso de producción.

A continuación, se presenta el resultado de varias investigaciones que han analizado el ciclo de vida de materiales a base de micelio, validando el potencial ambiental por su baja huella de carbono respecto otros materiales.

Investigación 1

Stelzer et al., 2021, realiza un análisis del ciclo de vida de un bloque de micelio del hongo *Fomes fomentarius* de dimensiones (24x11.5x7.1 cm), en varios sustratos como cáñamo, astillas de madera de álamo y paja de colza, a escala de laboratorio, comparado con la producción del bloque a escala industrial y comparado con bloques convencionales usados en el campo de la construcción. El objetivo es identificar el impacto ambiental a partir del análisis “*cradle to gate*” donde se estudia el proceso de producción desde la extracción de materias primas, transporte a fábrica y producción, estableciendo los límites del proceso y las categorías ambientales a las que se afecta.

La producción del bloque a base de micelio se aborda en 4 pasos: pre-cultivo, cultivo del grano, cultivo en el sustrato y moldeado; escenarios donde se agrupa los datos de entrada para el modelo. Cada paso tiene múltiples requerimientos para ser ejecutado, estos requerimientos incluyen materiales, instrumentos, equipos, energía, transporte, moldes, producción del sustrato, entre otros, que en resumen son todas las actividades y herramientas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de este material. Los requerimientos tienen un consumo energético y tal consumo genera un impacto ambiental que se puede cuantificar. En la Tabla 2-2, se indican los materiales y el proceso, según cada paso de estudio.

Tabla 2-2 Procesos y materiales usados para la producción de un bloque de micelio (Fuente: Adaptado de referencia Stelzer et al., 2021)

Cultivo	Proceso/Materiales
Pre-cultivo	Placa Petri
	Final de vida -Placa Petri
	Formación de Placas Petri
	Guantes

	Final de vida - guantes
	Medio (Agar)
	Esterilización / incubación
Cultivo en grano	Mezcla de granos
	Transporte
	Esterilización / incubación
Cultivo en sustrato (Cáñamo)	Bolsas de sustrato
	Final de vida -Bolsa de sustrato
	Paja de cáñamo
	Hidratación del sustrato
	Transporte
	Esterilización / incubación
Cultivo en sustrato (Paja de colza)	Paja
	Hidratación del sustrato
	Transporte
Cultivo en sustrato (Astillas de madera de álamo)	Astillas de madera de álamo
	Hidratación del sustrato
	Transporte
Moldeado	Lámina
	Fin de vida - Lámina
	Incubación
	Secado

El potencial de los impactos ambientales para este estudio fue determinado por las categorías: cambio climático, acidificación, eutrofización, smog, uso del suelo y escasez de agua. Categorías medidas por métodos estandarizados y comúnmente utilizados en estudios de impacto ambiental para obtener valores en términos de cantidad de emisiones. Las categoría de impacto se indican en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Categoría de impacto/unidad/método de evaluación (Fuente:adaptado de Stelzer et al., 2021)

Categoría de impacto	Unidad	Método aplicado
Cambio climático	kg CO ₂ ¹ equivalentes	

¹ CO₂: Dióxido de carbono

Acidificación	kg SO ₂ ³ equivalentes	CML ²
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ ⁴ equivalentes	
Smog	kg NOx ⁵ equivalentes	ReCiPe ⁶
Uso del suelo	Adimensional	LANCA ⁷
Escasez de agua	m ³ mundiales equivalentes	AWARE ⁸

La Tabla 2-4, muestra el resultado de las emisiones del bloque en sustrato de cáñamo, que es referencia para el bloque de micelio en los otros dos sustratos. Emisiones para cada categoría de acuerdo a los pasos establecidos para el cultivo. El paso 3, cultivo en sustrato, tiene el impacto más alto en todas las categorías consideradas, pues al tratarse de un producto agrícola necesita ser cultivado, influenciando el uso del suelo, eutrofización, acidificación y smog por el uso de fertilizantes, ya que emiten amonio, nitrógeno, metano, óxidos al aire y nutrientes inorgánicos al agua, también influye en escasez de agua por irrigación, cambio climático, acidificación y smog por la electricidad en la producción de las bolsas para el sustrato y por los procesos de esterilización, incubación y secado. El paso 1, pre-cultivo, tiene el impacto más bajo al considerar herramientas de trabajo pequeñas, por lo tanto, la energía para esterilización es más baja en comparación con el paso 3 y 2. El impacto en el paso 2, es influenciado principalmente por la producción del grano, similar la producción del cáñamo, donde se requieren fertilizantes afectando a la categoría de eutrofización, por último, el paso 4, moldeado, es afectado principalmente por el uso de energía para el secado del bloque.

Tabla 2-4 Resultados de la cuantificación del impacto de categorías para un bloque en sustrato de cáñamo (Fuente: Stelzer et al., 2021)

³ SO₂: Dióxido de azufre

² CML: Centre for Environmental Studies

⁴ PO₄³⁻: Ión fosfato

⁵ NOx: Óxidos de nitrógeno

⁶ ReCiPe: Cálculo del impacto ambiental de punto medio y puntos finales

⁷ LANCA: Método para recomendaciones de huella ambiental

⁸ AWARE: Available Water Remaining

Factores de caracterización	Pre-cultivo	Cultivo en grano	Cultivo en sustrato	Moldeado	Total
Acidificación (kg SO₂ eq)	2.41E-05	2.72E-04	3.63E-04	2.80E-04	9.39E-04
Eutrofización (kg PO₄³⁻ eq)	4.13E-06	2.45E-04	3.04E-04	4.98E-05	6.02E-04
Cambio climático (kg CO₂ eq)	1.81E-02	5.68E-02	2.10E-01	2.09E-01	4.94E-01
Uso del suelo	8.10E-02	5.76E-01	1.74E+01	1.29E+00	1.93E+01
Escasez de agua (m³ mundiales eq)	1.00E-03	6.59E-03	9.42E-03	4.98E-03	2.21E-02
Smog (NOx)	1.91E-05	1.02E-04	2.46E-04	2.16E-04	5.83E-04

En la Tabla 2-5, se muestra la comparación de los impactos totales, es decir, la suma de las emisiones de cada paso de producción para todas las categorías. El bloque en sustrato de astillas de madera tiene un mejor comportamiento en términos ambientales, debido a que no se trata de un sustrato agrícola cultivado, por lo tanto, no necesita fertilizante, contrario a la paja de colza, donde el uso de este impacta a las categorías de eutrofización y acidificación, como se explicó anteriormente.

Tabla 2-5 Comparación de la producción de un bloque en sustrato de paja y en sustrato de astillas de madera respecto al bloque en sustrato de cáñamo (Fuente: Stelzer et al., 2021)

Categoría de impacto	Bloque de paja	Bloque de astillas de madera
Acidificación	33.37%	-7.56%
Eutrofización	21.14%	-49.40%
Cambio climático	-17.31%	31.29%
Uso del suelo	2.19%	0.61%
Escasez de agua	0.31%	6.35%
Smog	-2.79%	0.01%

Cuando se proyecta la producción de un bloque de micelio a una escala industrial, se mejoran prácticas en el desarrollo para que se reduzca el impacto ambiental negativo. En la Figura 2-3, se muestra la producción del bloque de micelio en sustrato de cáñamo a escala de laboratorio (naranja) y a escala industrial (amarillo), y se evidencia un menor impacto en todas las categorías para la producción a escala industrial respecto a la producción en laboratorio, ya que se implementa pasteurización en vez de esterilización,

lo que genera una reducción considerable en el uso de energía, también se elimina el uso de plásticos y se asume una optimización en el secado del material, lo cual aumenta el rendimiento ambiental del bloque a gran escala.

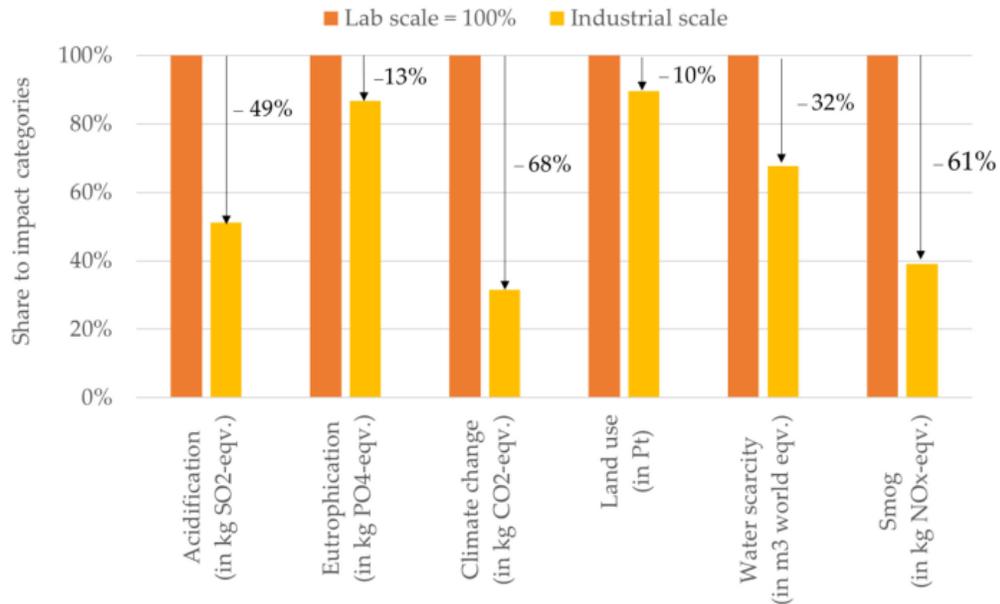


Figura 2-3 Comparación del impacto de un bloque de micelio en sustrato de cañamo a escala de laboratorio respecto a una escala industrial (Fuente:Stelzer et al., 2021)

Para tener un entendimiento de la ganancia ambiental de un bloque de micelio se presenta la Tabla 2-6, allí se compara la producción de un bloque de micelio en sustrato de cañamo a escala de laboratorio, a escala industrial, con un bloque de fachada, un bloque de limo-arena y un bloque de concreto. En la figura se evidencia un comportamiento significativamente mejor para el bloque de micelio que para los bloques de materiales convencionales a escala industrial en las categorías de acidificación, cambio climático, escasez de agua y smog, y se nota buena reducción en la categoría de cambio climático donde un bloque de concreto genera 2.5 veces más CO₂ que un bloque a base de micelio, los bloques de fachada y de limo, con 3 y 6 veces más CO₂ respectivamente. Debido a que el sustrato es un producto agrícola, las categorías de uso de suelo y eutrofización tienen mejor comportamiento en los bloques de materiales convencionales.

Tabla 2-6 Comparación del impacto ambiental de un bloque de micelio en sustrato de cáñamo a escala de laboratorio respecto a bloques de materiales convencionales (Fuente: Stelzer et al., 2021)

Categoría de impacto	Bloque de cáñamo a escala de laboratorio	Bloque de cáñamo a gran escala	Bloque de fachada	Bloque de limo-arena	Bloque de concreto	
Acidificación (kg SO ₂ eq)	0.024	0.012	0.024	0.009	0.021	Malo
Eutrofización (kg PO ₄ ³⁻ eq)	0.015	0.013	0.004	0.002	0.004	
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	12.300	3.900	25.500	12.200	10.100	
Uso del suelo (kg de Pt eq)	1110.000	1010.000	53.700	151.000	26.200	
Escasez de agua (m ³ mundiales eq)	0.552	0.374	0.545	0.808	0.747	
Smog (NO _x)	0.015	0.006	0.030	0.013	0.028	Bueno

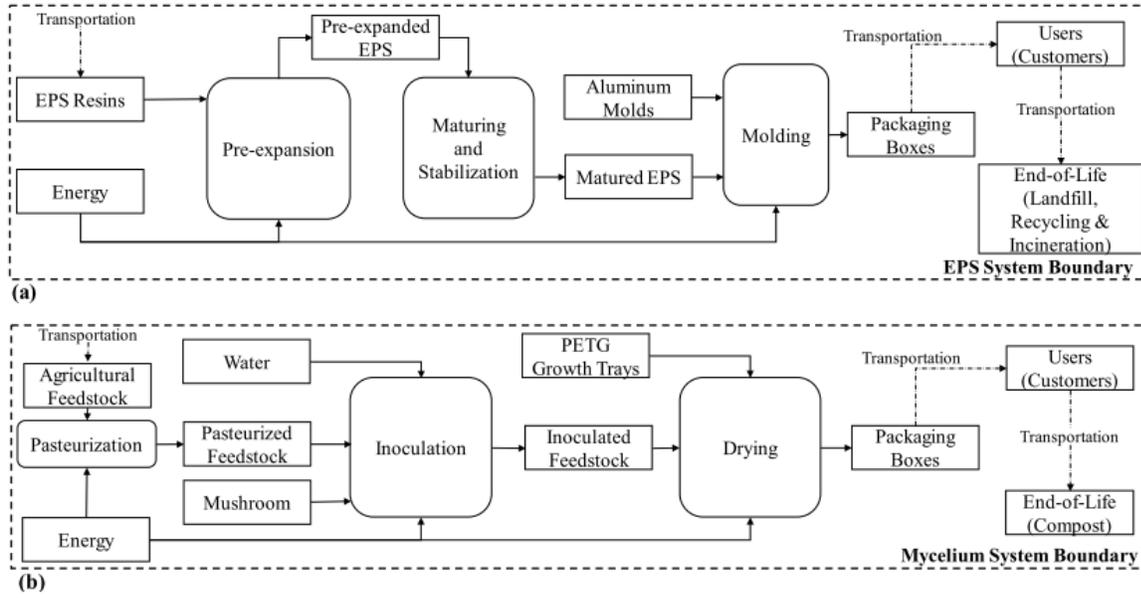
Como conclusión, el proceso agrícola y el uso de energía, son los factores principales que generan mayor impacto ambiental en la producción del bloque a base de micelio, sin embargo, este tipo de material representa un potencial significativo en la reducción de emisiones, ya que para otras categorías tiene mejor comportamiento reduciendo la huella ambiental respecto a los bloques de los otros materiales convencionales, como el concreto, limo y bloque de fachada.

Investigación 2

Enarevba & Haapala, 2023, realizan la comparación del impacto ambiental como resultado del análisis del ciclo de vida (ACV) para un inserto utilizado empaques con dimensiones 15.56x15.24x7.62 cm (tamaño estándar en envíos americanos), desarrollado en micelio y en poliestireno expandido (EPS). El impacto ambiental de los insertos es analizado según “*gate to grave*” que comprende actividades como la producción, el uso y la disposición del material.

El análisis del ciclo de vida (ACV) comprende cuatro fases: definición del objetivo, análisis de inventario (delimitación del proceso a estudiar), análisis de impacto y por último la

interpretación. En la Figura 2-4, se muestra el proceso de producción del inserto de poliestireno expandido y del inserto a base de micelio. El poliestireno expandido es un producto derivado del petróleo y su producción comienza con la extracción del aceite crudo que es destilado para producir un componente llamado nafta, este es sometido a un proceso de desulfuración para producir benceno y etileno. La reacción entre el benceno y el etileno produce estireno y poliestireno; materia prima en forma de perlas que son formadas por extrusión para convertirse en empaque. Este último proceso se da en tres escenarios: pre-expansión, maduración y expansión en molde. En la expansión en molde, se utiliza vapor para expandir las perlas que posteriormente son almacenadas en silos donde se maduran y estabilizan, finalmente son inyectadas en un molde para ser expuestas a vapor, donde se unen las perlas de poliestireno y forman el molde del inserto. (Enarevba & Haapala, 2023). El final del poliestireno expandido se da en un relleno sanitario, como material reciclado o incinerado. La producción del inserto del micelio comienza con la pasteurización del sustrato, para eliminar microorganismos que pueden afectar el crecimiento del hongo. Luego el sustrato es inoculado para darle lugar a la colonización del hongo durante un proceso de incubación, donde las fibras del micelio conectarán al sustrato en un determinado molde. Posterior al formado, el material de micelio es sometido a un proceso de secado para inhibir el crecimiento del hongo y una vez se tiene el material, este puede ser usado y finalmente compostado.



**Figura 2-4 Límites de es estudio para ACV de a) Inserto de poliestireno expandido
b) Incerto a base de micelio.(Fuente:Enarevba & Haapala, 2023)**

Se utiliza la metodología ReCiPe 2016 para la evaluación de los impactos intermedios y efectos finales *midpoints – endpoints*, adicionalmente se utilizan los métodos CED y IPCC 2021 GWP100 para evaluar los impactos relacionados con energía y carbono. En la Figura 2-5, se presenta las categorías de impacto afectadas con los procesos de producción de cada inserto. El inserto de micelio tiene mayor impacto que EPS en la categoría de agotamiento del ozono estratosférico y en eutrofización, consecuencia del uso de fertilizantes en la producción del sustrato. El inserto de EPS por el contrario, tiene impactos significativamente más altos en el resto de categorías con excepción del uso del suelo, valores de impactos altos en la salud humana, ecosistemas y recursos naturales.

Impact category	Unit	Mycelium	EPS
Global warming, Human health	DALY	1.21E-01	2.86E-01
Global warming, Terrestrial ecosystems	species.yr	3.65E-04	8.63E-04
Global warming, Freshwater ecosystems	species.yr	9.97E-09	2.36E-08
Stratospheric ozone depletion	DALY	5.16E-05	4.21E-05
Ionizing radiation	DALY	2.98E-04	4.40E-04
Ozone formation, Human health	DALY	1.91E-04	3.66E-04
Fine particulate matter formation	DALY	2.04E-01	3.35E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	species.yr	2.78E-05	5.47E-05
Terrestrial acidification	species.yr	7.71E-05	1.42E-04
Freshwater eutrophication	species.yr	8.09E-05	1.87E-04
Marine eutrophication	species.yr	3.77E-08	3.65E-08
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	2.00E-06	3.06E-06
Freshwater ecotoxicity	species.yr	2.83E-06	7.23E-06
Marine ecotoxicity	species.yr	5.70E-07	1.49E-06
Human carcinogenic toxicity	DALY	2.10E-02	4.49E-02
Human non-carcinogenic toxicity	DALY	2.45E-02	7.19E-02
Land use	species.yr	3.62E-05	3.66E-05
Mineral resource scarcity	USD2013	3.04E+01	4.93E+01
Fossil resource scarcity	USD2013	8.18E+03	3.27E+04
Water consumption, Human health	DALY	1.81E-03	1.61E-02
Water consumption, Terrestrial ecosystem	species.yr	1.68E-05	9.75E-05
Water consumption, Aquatic ecosystems	species.yr	4.49E-09	6.70E-09

Figura 2-5 Impactos ambientales de insertos de EPS y micelio usando ReCiPe 2016 Endpoint (Fuente: Enarevba & Haapala, 2023)

En los resultados del análisis de los métodos CED (Micelio: 2.86E+00 TJ – EPS: 6.08E+00 TJ) y IPCC 2021 GWP100 (Micelio: 1.28E+05 kgCO₂ eq – EPS: 2.99E+05 kgCO₂ eq), el ciclo de vida del inserto de poliestireno expandido necesita dos veces más energía que el inserto de micelio, para la producción de la materia prima y para los procesos de pre-expansión y expansión, similarmente en la categoría del potencial del calentamiento global, el inserto del poliestireno expandido tiene un mayor impacto.

El inserto de micelio tiene menores impactos ambientales en los tres métodos respecto al inserto al poliestireno expandido, lo que representa una ventaja significativa en la industria de materiales para empaques. Sin embargo, para reducir aún más los impactos ambientales, puede implementarse mejoramientos al proceso, por ejemplo, utilizar métodos de baja energía para el proceso de secado y estimular el uso local del producto para reducir el transporte.

Investigación 3

Por último, se presenta el estudio del análisis de vida de 1 m² cuero de micelio, llamado Reishi™ de la empresa MycoWorks. Estudio realizado por Williams et al., 2022, a partir del análisis “*cradle to gate*” para evaluar los impactos ambientales de acuerdo a los escenarios y categorías definidas como datos de entrada del modelo. El análisis incluye la extracción de la materia prima, producción, post-procesamiento, acabado y empaque del cuero. Se evalúan las categorías como escasez de agua, ecotoxicidad, uso del suelo, eutrofización y cambio climático. Cambio climático es considerado uno de los problemas más urgentes de este tiempo y es un buen predictor para otros impactos ambientales.

El proceso de producción para obtener los datos de entrada del modelo, es delimitado en cuatro escenarios: Escala piloto – día uno, escala piloto actual, a gran escala – día uno, a gran escala con mejoramientos. El escenario uno, incluye actividades de preparación del sustrato, crecimiento del micelio, post procesamiento (curtumbre, lubricación y secado) y acabado. Se utiliza energía corriente para el auto-clavado, gas natural para el calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y energía eólica para la electricidad de la instalación. El escenario dos, comprende las mismas actividades del escenario uno, pero implementa un mejoramiento en la generación de energía para HVAC, usando una tecnología más eficiente. En este escenario también se sustituye el químico del tanino por lubricantes menos contaminantes. El escenario 3, mantiene las mejoras del escenario 2 y además para actividades del post-procesamiento, se elimina el envío del material para curtumbre. Para la producción del cuero se utiliza energía solar e hidroeléctrica en vez de energía eólica, se implementa el biogás en lugar de gas natural para las actividades de HVAC y para el proceso de autoclavado. Por último, en el escenario 4, se implementan todos los mejoramientos de los escenarios anteriores, y adicionalmente se recicla la fuente del sustrato.(Williams et al., 2022).

De acuerdo a lo anterior se analizan los grupos de producción en las siguientes actividades:

Producción de materia prima para una lámina de cuero: Producción y pre-procesamiento de todos los materiales requeridos para una lámina de Reishi™, incluye transporte a la instalación de producción

Energía usada para una lámina de producción: Energía requerida para las mediciones, mezclado, autoclavado, colonización y crecimiento.

Uso de energía en las instalaciones de producción: Energía requerida para HVAC e iluminación de la instalación de producción.

Tratamiento de residuos en las instalaciones de producción: Tratamiento de los residuos generados en la instalación de producción.

Transporte: Transporte del material entre el centro de producción y la instalación de curtumbre (Escenario uno).

Post-procesamiento químico: Producción de químicos y otros materiales requeridos para lubricación, secado y acabado del material.

Operaciones de postproducción: Empaque.

En la Tabla 2-7 se indica la huella de carbono de cada actividad requerida en la producción de 1 m² de cuero de micelio Reishi™. El escenario 1, escala piloto - día uno, presenta el valor más alto de emisión respecto a los demás escenarios, dado que en sus actividades no se ha implementado ningún mejoramiento. Presenta mayor contribución en el uso de energía para las instalaciones de la producción (57%), seguido por la producción de materia prima (15%), luego el post-procesamiento (9%) y las demás actividades presentan valores bajos de emisión.

En el escenario dos, escala piloto actual, contribuye con un total de emisiones de 6.2 kg de CO₂ por m², valor reducido en más del 50% respecto a la emisión del escenario uno, 14.5 kg de CO₂ por m², resultado debido al mejoramiento implementado, descrito anteriormente. La eliminación de químicos del tanino reduce significativamente las emisiones del post-procesamiento y de las operaciones de curtumbre.

En el escenario tres, gran escala – día uno, se tienen emisiones parecidas al escenario uno 13.88 kg de CO₂ por m², donde la mayor contribución se da por la energía requerida para la lámina de producción (60%), debido a que la producción a gran escala tiene más capacidad, el biogás utilizado en el proceso de autoclavado presenta un impacto más alto que la energía eólica utilizada en el escenario uno. Una mayor producción, permite vender las láminas de cuero a menor precio, por lo tanto, la asignación económica es menor y en consecuencia contribuye a un menor impacto en la producción de Reishi™.

En el escenario 4, producción a gran escala con mejoramientos, se evidencia una reducción muy significativa respecto a las demás escalas, debido a que la implementación de los mejoramientos anteriormente explicados, reducen la energía de la instalación de producción y la energía para la producción de la lámina. Al tener una instalación con más

capacidad para producción, las actividades de curtumbre se realizan in situ, eliminando las emisiones por transporte.

Tabla 2-7 Huella de carbono para cada escenario de producción de Reishi (Fuente: Williams et al., 2022)

	Escala piloto -día 1	Escala piloto actual	A gran escala - día 1	A gran escala con mejoramientos
Huella de carbono total	14.5	6.2	13.88	2.76
	kgCO₂ eq	kgCO₂ eq	kgCO₂ eq	kgCO₂ eq
Materia prima para lámina de producción	15.23%	26.58%	14.60%	12.07%
Energía para la producción	7.04%	16.00%	60.37%	40.75%
Energía para las instalaciones	57.09%	44.49%	20.76%	31.96%
Tratamiento de los desechos de producción	3.08%	7.02%	3.06%	9.12%
Transporte	0.93%	2.18%	0.00%	0.00%
Post procesamiento químico	9.98%	0.04%	0.02%	0.20%
Operaciones de curtumbre	6.33%	2.97%	0.87%	4.39%
Empaque	0.30%	0.71%	0.32%	1.60%

El análisis ambiental realizado a este tipo de material desde una escala piloto, ayuda significativamente a optimizar los procesos para cada escenario, mejorando la eficiencia en el uso de energía para la producción y funcionamiento de la instalación, ya que estas actividades principales contribuyen a un aumento en el impacto ambiental con mayores emisiones. Sin embargo, estas emisiones representan valores bajos respecto a la producción del cuero animal. En la Figura 2-6, se indica la emisión de CO₂ para la producción por m² de cuero animal en comparación con el cuero de micelio, producido en tres variantes: tela embebida en la lámina de micelio, poliéster reciclado embebido en la lámina de micelio y lámina de únicamente micelio. Se observa entonces una diferencia muy significativa en la cantidad de emisiones generadas por m² de cuero animal 32.97 kg de CO₂ por m², respecto a cualquiera de las variantes del cuero de micelio.

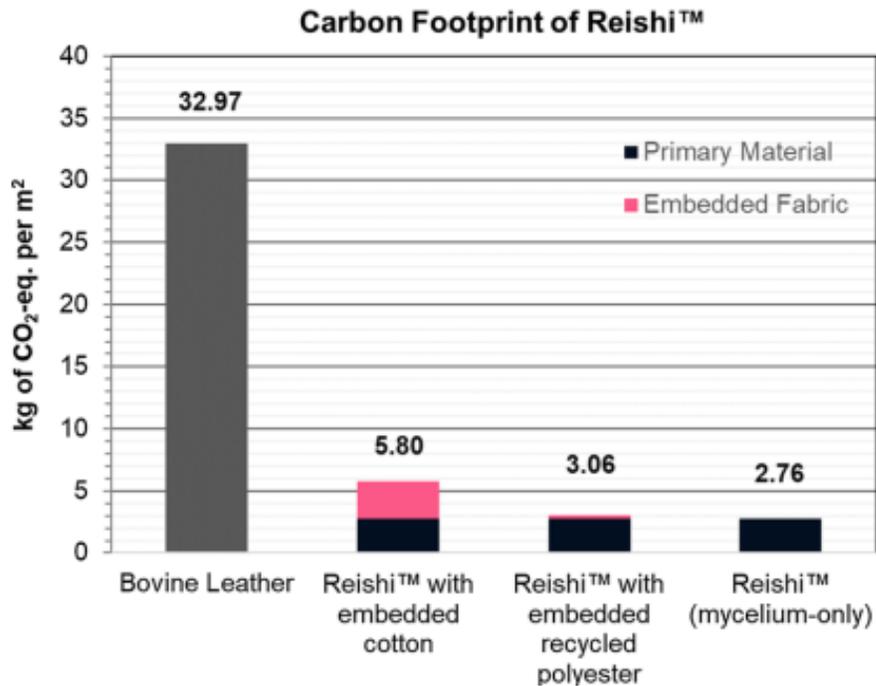


Figura 2-6 Comparación de huella de carbono entre cuero animal y cuero Reishi™ (Fuente:Williams et al., 2022)

A continuación, se muestra la Figura 2-7, que indica el impacto generado por la producción de 1 m² de cuero de micelio Reishi™, de acuerdo a las categorías ambientales evaluadas. Los resultados para el escenario uno, representan el 100% y respecto a este escenario se analizan los demás. Las categorías con mayores impactos son efecto en la salud de los humanos y cáncer, eutrofización marina, uso del suelo, uso de recursos, minerales y metales, impactos que dependen del escenario, por diferentes consumos como consecuencia de la implementación paulatina de mejoras que reducen o aumentan los efectos negativos al ambiente.

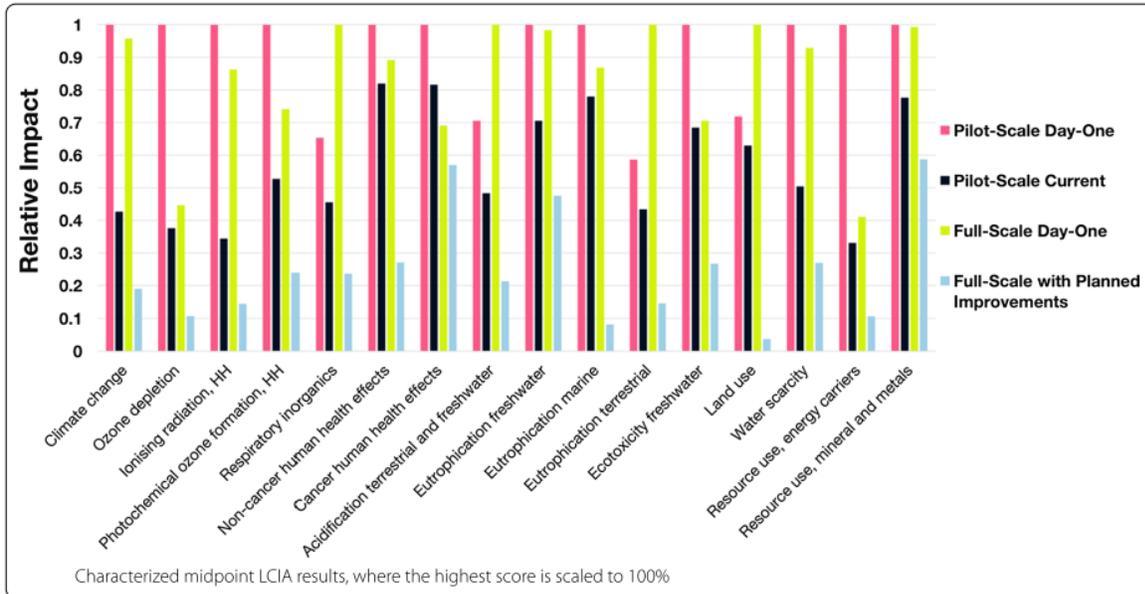


Figura 2-7 Resultados a medio punto de análisis del impacto del ciclo de vida

Como conclusión, el desarrollo de tecnologías para sustituir materiales como el cuero animal, sí ayudan a reducir el impacto ambiental ya que generan bajas emisiones de gases en comparación con las emisiones generadas por el cuero animal, 94% mayor. La reducción se debe a mejoras en el consumo energético de las instalaciones para su producción, también por reciclar desechos agrícolas para el sustrato y por un análisis continuo de cómo mejorar la práctica para que el impacto ambiental sea cada vez menor.

3. Capítulo 3: Desarrollo del biomaterial y caracterización físico- mecánico

Los hongos son los microorganismos mejor conocidos capaces de degradar los polímeros presentes en la madera (Royse, 2017).

En este capítulo, se describe la función del hongo *Pleurotus ostreatus* como organismo capaz de degradar compuestos lignocelulósicos. Se indica la composición del sustrato utilizado y el procedimiento del cultivo. Se describen las pruebas físico-mecánicas y se muestran los resultados de las pruebas realizadas al biomaterial para conocer su capacidad y su potencial dentro del campo de la construcción. Se realiza un análisis estadístico para validar el resultado de la resistencia del material y se calcula la incertidumbre asociada a la medición de los parámetros del cálculo de la conductividad térmica, se muestra el resultado de pruebas complementarias para conocer el coeficiente de absorción acústica y el porcentaje de absorción de agua. Se concluye la respuesta de las pruebas y se analiza su aplicabilidad. Por último se compara las propiedades del material obtenido respecto a materiales convencionales.

3.1 Especie de hongo “*Pleurotus ostreatus*”

El hongo utilizado para el desarrollo de la investigación, es el hongo *Pleurotus ostreatus*. Esta especie tiene buena resistencia ante la presencia de bacterias y es de fácil cultivo ya que no necesita de un ambiente estrictamente aséptico para poder crecer (Montalti, 2018). El hongo fue adquirido al Grupo de Investigación en Ecología Microbiana y Bioprospección de la Universidad de Antioquia. A continuación, se describe la clasificación del hongo y sus características como especie descomponedora.

Reino: **Fungi**

División: **Basidiomycota**

Clase: **Basidiomiceto**

Orden: **Agaricales**

Género: **Pleurotus**

Especie: **Ostreatus**

El género de los *Pleurotus* hace parte de los hongos saprófitos, caracterizados por tener la capacidad de degradar la naturaleza muerta de los bosques y selvas, contribuyendo al reciclaje de nutrientes. Gracias a que es un tipo de hongo que se adapta fácil a sustratos de diversas composiciones, como residuos agrícolas y agroindustriales, es de fácil cultivo. Se tiene evidencia que el *Pleurotus ostreatus* tiene una transformación eficiente de residuos agrícolas por la buena producción de enzimas que le permite sintetizar los nutrientes para el desarrollo del micelio y su fructificación. Las enzimas hidrolíticas y oxidativas que excreta, se han utilizado para diversos procesos como la obtención de biofertilizantes, biopesticidas, biorremediación, biotecnología, entre otros. (Royse, 2017).

En general los hongos saprófitos son los microorganismos mejor conocidos capaces de descomponer los polímeros presentes en la lignocelulosa, por la secreción de enzimas al exterior de las células que dividen las complejas asociaciones de estos polímeros para ser absorbidas como nutrientes (Royse, 2017).

La lignocelulosa cumple función estructural y presente en todo material vegetal, desde árboles hasta pajas, rastrojos, bagazos, también encontrada en desechos agroforestales. Constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa y la hemicelulosa son macromoléculas de diferentes azúcares y la lignina es un polímero aromático. Las concentraciones de estos polímeros dependen del tipo de planta, la edad y de su estado fisiológico. La mayoría de desechos agrícolas está conformada por 10-25% de lignina, 20 - 30% de hemicelulosa y 40 - 50% de celulosa (Royse, 2017).

Según la especie de hongos, la degradación de compuestos lignocelulósicos puede ser diferenciada, ya que unos pueden descomponer a los hidratos de carbono, otros descomponer la lignina y otros descomponer ambas sustancias. De acuerdo a estas preferencias, los hongos se pueden clasificar en hongos de pudrición blanda, hongos de pudrición oscura y hongos de pudrición blanca. El término de pudrición hace referencia al deterioro de la madera y para cada tipo se producen diferentes enzimas permitiendo colonizar diferentes sustratos (Royse, 2017).

La degradación de la especie de *Pleurotus*, pertenece al tipo de pudrición blanca selectiva, donde la lignina es degradada rápidamente en el inicio del crecimiento, debido al rompimiento progresivo de su estructura polimérica hasta liberar compuestos de bajo peso molecular, es decir, fragmentos pequeños de lignina que son de más fácil absorción.

Para la degradación de materiales lignocelulósicos, las enzimas que excreta el género *Pleurotus*, son de dos tipos. El sistema hidrolítico produce enzimas hidrolasas (Celulasas, Hemicelulasas) responsables de la degradación de la celulosa y la hemicelulosa, y del sistema oxidativo que depolimeriza la lignina, produce Lacasas y Peroxidasas (Royse, 2017).

La conformación del sustrato puede asociarse con la forma en la que se degradan los polímeros naturales; en el cultivo de cepas de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos lignocelulósicos, las enzimas que degradan la celulosa y la hemicelulosa se encuentran relacionadas con la producción del fructífero y de los basidiomas, mientras que las enzimas oxidativas aparecen durante las primeras etapas del desarrollo micelial (Royse, 2017).

En la Figura 3-1, se sintetiza la información de las enzimas generadas por el hongo *Pleurotus ostreatus* para degradar material lignocelulósico, con breves descripciones acerca de las funciones que realizan para convertir las macromoléculas y polímeros en compuestos más simples de absorber, como la glucosa. Enzimas provenientes de dos sistemas que generan celulasas, hemicelulasas y ligninolíticas que se activan al encontrarse en contacto con sustratos que contienen celulosa, hemicelulosa y lignina, respectivamente. La información de la degradación por parte del hongo es de gran utilidad ya que permite conocer las preferencias nutritivas del hongo, la etapa de su crecimiento en el que se generan determinadas enzimas, información que finalmente da lugar a una mejor conformación de un sustrato eficaz para el crecimiento micelial.

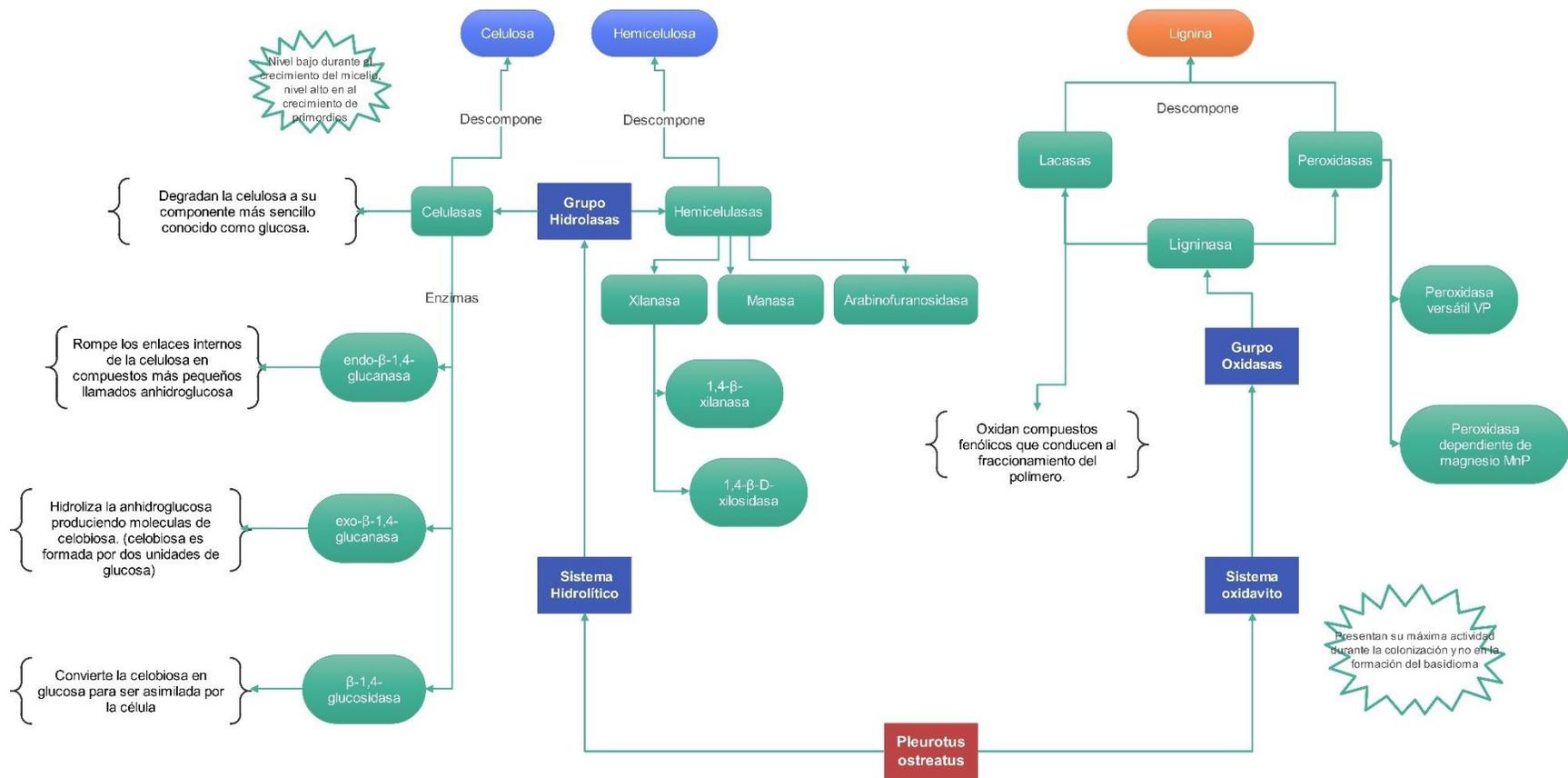


Figura 3-1 Degradación de la lignocelulosa - *Pleurotus ostreatus* (Fuente: Elaboración propia a partir de Royse, 2017)

3.2 Sustrato y preparación

Los residuos madereros son compuestos potenciales para desarrollar materiales a base de micelio, en primer lugar, contienen nutrientes que los hongos saprofitos necesitan y, en segundo lugar, por su disponibilidad. Según el Boletín Estadístico Forestal del 2022 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022), el volumen de madera movilizada en Antioquia para el 2021 fue de 817 430 m³ donde solo el 20% del árbol es utilizado, un 40% lo constituye las hojas y las ramas, y el 40% restante corresponde a los procesos de aserrío (Ministerio de Minas y Energía, 2006). En este contexto, la cantidad de desechos producidos en Antioquia por la industria maderera fue aproximadamente de 326 972 m³. La cantidad de residuos, es en parte resultado de una gestión poco eficiente para extraer y transformar la madera, debido a la carencia de herramientas óptimas, tecnología y mano de obra calificada; presencia de intermediarios como transportadoras, comisionistas, que generan irregularidades en el proceso de extracción y aserrado, dando lugar a la informalidad en esta industria. Lo anterior, interfiere con la falta de implementación de un buen plan para el manejo de los residuos, generando así, problemas a la salud de las personas y al ambiente (López et al., 2020).

Para el desarrollo del biomaterial se utilizaron desechos madereros del sector forestal y de una marquetería local donde se trabaja con madera aserrada. El aserrín, la fibra y los chips, no tienen preparación adicional, contrario a las fibras de fique, que se cortaron y licuaron para separarlas. En este sentido, el sustrato está compuesto por:

Aserrín: Desechos de madera aserrada de la especie del árbol Roble, obtenidos de una marquetería local.

Fibras de eucalipto y pino: Desechos de la producción de tableros de fibras de baja, media y alta densidad, de las especies *Eucalipto urograndis* de 7 años de edad y *Pino pátula*, de 12 años de edad provenientes de la empresa Dexco S.A.

Fibra de Figue: Fibra natural de la especie de planta *Furcraea andina*, comprada en mercado campesino local.

Chips: Partículas de rechazo entre tamaños 1 a 15 mm de ancho y 2 mm de espesor, de las especies *Eucalipto urograndis*, provenientes de la empresa Dexco S.A.

En la Figura 3-2, se muestra los materiales que conforman del sustrato: aserrín, fibras y chips.



Figura 3-2 Conformación del sustrato. A: Aserrín, B: Fibras de Eucalipto y Pino, C: Fibra de fique, D: Chips

Para tener un conocimiento general, se indaga en la literatura existente por el contenido de lignocelulosa para las especies mencionadas que conforman el sustrato, si bien el contenido de esta sustancia varía de acuerdo a la edad, lugar de cultivo, las condiciones ambientales, entre otros factores, en la Tabla 3-1 se presenta información teórica del contenido de lignocelulosa en los desechos madereros.

Tabla 3-1 Contenido de lignocelulosa en sustrato (Fuente: Elaboración propia)

Especie	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Referencia
<i>Eucalipto urograndis</i>	64.2%		27%	(Vieira et al., 2021)
<i>Pino pátula</i>	38-50%	11-35%	25-35%	(Royse, 2017)

La Figura 3-3, muestra el sustrato compuesto dentro de las bolsas autoclavables, mezclado para esterilizar.



Figura 3-3 Preparación del sustrato. A: Mezcla de sustrato. B: Sustrato en bolsas autoclavables. C: Sustrato mezclado para esterilización

3.3 Metodología de cultivo del biomaterial

El desarrollo del biomaterial a través del cultivo del micelio del hongo *Pleurotus ostreatus* en un sustrato compuesto por residuos madereros provenientes de la industria forestal local, se realizó acorde a metodología reportada en la literatura con diversas modificaciones, en este contexto, se conformaron distintos prototipos cuyas dimensiones están bajo los estándares establecidos por la norma de cada ensayo a realizar; estos ensayos corresponden a: ensayo a compresión simple y prueba de placas calientes para la determinación de la conductividad térmica.

La práctica experimental realizada en laboratorio de Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Los equipos y herramientas utilizadas para el desarrollo son las siguientes:

Autoclave 1 Marca: Tuttnauer, Modelo 2840EL – D

Autoclave 2 Esterilizador de vapor eléctrico Marca: Olizee

Cámara climática Marca: Memmert, Modelo ICH 260 L

Horno de conexión forzada Marca: Memmert, Modelo UFE600

Herramientas adicionales: Bolsas autoclavables, agua destilada, recipientes, moldes, balanza, mezcladores.

En la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se indican las condiciones ambientales de cultivo, la cantidad de sustrato utilizado, tiempo de crecimiento, tiempo de secado entre otras características descritas en cada paso de la metodología, para las muestras del ensayo a compresión y para el ensayo de conductividad térmica respectivamente.

Tabla 3-2 Condiciones de cultivo - ensayo a compresión
(Fuente: Elaboración propia)

Procedimiento	Cilindros (Ensayo de compresión)	
	Con Chips	Sin Chips
Conformación del sustrato Peso (g)	Aserrín = 438 Fibra de eucalipto = 81 Fibra de fique = 16 Chips = 182 10%Almidón de yuca Aly (*)	Aserrín = 438g Fibra de eucalipto = 81 Fibra de fique = 16 10%Almidón de yuca Aly (*)
Esterilización	Autoclave 20 minutos	
Inoculación	Medio sólido Volumen del "spawn" = 10%Wt	
Incubación	Humedad (%) /Temp. (°C)/Tiempo (días)	
Fase 1	65/25/8	
Fase 2	65/25/30	
Homogenización	Humedad (%) /Temp. (°C)/Tiempo (días)	
	65/25/15	
Secado	Horno – Convección 5 horas a 70°C	
Post - procesamiento	Recubrimiento con cal y con Tanino (Quebracho)	
Cantidad y Dimensiones de las muestras (mm)	8 (chips) + 8 (sin chips). Altura=100 Diámetro=50	

(*) La cantidad de almidón de yuca, equivale al 10% del peso total del sustrato.

Tabla 3-3 Condiciones de cultivo – ensayo de placas calientes**(Fuente: Elaboración propia)**

Procedimiento	Placas (Prueba de conductividad térmica)
	Sin Chips
Conformación del sustrato Peso (g)	Aserrín = 473 Fibra de eucalipto = 191 Fibra de fique = 36
Esterilización	Autoclave 20 minutos
Inoculación	Medio sólido Volumen del “spawn” = 10%Wt
Incubación	Humedad (%) /Temp. (°C)/Tiempo (días)
Fase 1	65/25/8
Fase 2	65/25/30
Homogenización	Humedad (%) /Temp. (°C)/Tiempo (días)
	65/25/15
Secado	Horno – Convección 5 horas a 70°C
Post - procesamiento	Recubrimiento con Tanino (Quebracho)
Cantidad y Dimensiones (mm)	2 placas 300x300x25

(*) La cantidad de almidón de yuca, equivale al 10% del peso total del sustrato.

Esterilización: Una vez agrupado cada uno de los componentes que conforman el sustrato en bolsas autoclavables, este es esterilizado en autoclave durante 20 minutos. El tiempo de esterilización es aceptado dentro del rango encontrado en la literatura para este tipo de material. Una vez el sustrato es esterilizado, se deja enfriar a temperatura ambiente para no inhibir las semillas del hongo cuando este sea inoculado.

Aditivos: Se adiciona almidón de yuca al sustrato, la cantidad corresponde al 10% del peso del mismo.

Inoculación: La cantidad de semillas inoculadas “Spwan”, corresponde al 10% del peso del sustrato, estas son introducidas en las bolsas autoclavables con el sustrato esterilizado y enfriado. Una vez realizada la inoculación se mezcla el interior de cada bolsa para distribuir las semillas dentro del sustrato.

Incubación: La etapa de incubación se realiza en dos fases, la primera consiste en colocar las bolsas inoculadas dentro de la cámara climática, bajo condiciones de humedad 65% y temperatura de 25°C, por 8 días, para iniciar un primer crecimiento del micelio y estimular las hifas removiendo las bolsas durante este tiempo, lo anterior ayuda a aumentar la resistencia y la densidad de las hifas, ver Figura 3-4. En la segunda fase se completa el volumen total del sustrato al material de la fase 1 (sustrato inoculado). En esta fase el sustrato a adicionar también es esterilizado bajo las mismas condiciones de la fase 1. Se observa el crecimiento del hongo durante un periodo de 8 días para luego ser colocado en las formaletas de los pertinentes a los ensayos, correspondientes al ensayo de compresión y de conductividad térmica.

El material de fase 1 mezclado con el material de fase 2, es introducido dentro de la formaleta de cada prototipo, para que el micelio termine de colonizar el material completo, por los siguientes 30 días. Luego de este tiempo, los prototipos son desmoldados y se dejan 8 días más para homogenizar la colonización



Figura 3-4 A Sustrato inoculado en bolsas – Fase 1: Colonización del hongo. B. Muestras en formaletas – Fase 2. C. Homogenización de las muestras

Secado: Pasado el tiempo de homogenización, las muestras desmoldadas se llevan al horno de secado por convección, para detener el crecimiento del hongo y permitirle compactarse a medida que pierde humedad. Las condiciones de secado fueron 70°C por 5 horas.

Post-procesamiento: Se implementa dos tipos de recubrimientos correspondientes a un tanino-quebracho y mortero cal, para evaluar si estos recubrimientos aportan resistencia a la compresión del material. Se ha encontrado que la adición de resinas puede influir de manera positiva en la resistencia de materiales base de micelio (Jones et al., 2020a). Por lo tanto, se accede a un tanino natural, extraído de la especie del árbol *Schinopsis balansae*. El mortero de cal es utilizado por sus múltiples funciones a lo largo de la historia de la construcción, inicialmente como tinte en pinturas de cuevas, como material ligante, material para revestimientos, restauraciones, construcciones, entre otros. Con base en estas funciones, es aplicado como revestimiento al biomaterial de micelio para comprobar si aporta resistencia a la compresión (Alvarez, 1995).

Descripción del Tanino: La corteza de los troncos de los árboles son ricas en componentes químicos extraíbles, entre ellos se encuentran los taninos, constituidos por fenoles solubles en agua. Las fuentes principales de taninos son las especies de árboles coníferas y leguminosas, alcanzando hasta el 40% de la masa seca del tronco. Su composición química permite diversas aplicaciones como sustituto de productos no renovables. Se han reportado usos principalmente en curtumbre de cueros, desarrollo de bebidas, en la industria farmacéutica, tratamiento de agua, como adhesivos y en tratamientos para conservar la madera. También puede ser considerado como una alternativa para sustituir parte las resinas sintéticas utilizadas en paneles aglomerados, debido a la similitud en su estructura química. Además de las distintas aplicaciones, el uso de taninos aporta en la reducción de emisión de gases asociadas las resinas derivadas del petróleo (da Silva Araujo et al., 2021).

El Quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) es un árbol de la familia de las Anacardiáceas nativo de Sudamérica, muy apreciado por su alto contenido de taninos. El tanino de Quebracho es una combinación de polifenoles obtenidos del duramen del árbol, que resulta soluble en agua caliente; tiene diversas aplicaciones, como recubrimiento, curtumbre, inhibidor de hongos y de corrosión (D'Alessandro et al., 2018). De acuerdo con

estas propiedades, el tanino Quebracho se considera una opción de recubrimiento en el postprocesamiento del biomaterial a base de micelio.

Para este caso, la preparación del tanino Quebracho es preparado en agua caliente a una temperatura de 80°C. El tanino en forma de polvo es disuelto hasta obtener una mezcla espesa para ser aplicado con pincel, superficialmente alrededor de los cilindros y las placas.

En la Figura 3-5 se observa el recubrimiento con el tanino-quebracho aplicado sobre las muestras los cilindros, que corresponde a 8 muestras, 4 para el sustrato con presencia de chips y 4 para el sustrato sin presencia de chips. También se observa el recubrimiento con el tanino-quebracho aplicado sobre la muestra de la placa para el ensayo de conductividad térmica. Las placas solo tienen un tipo de recubrimiento.

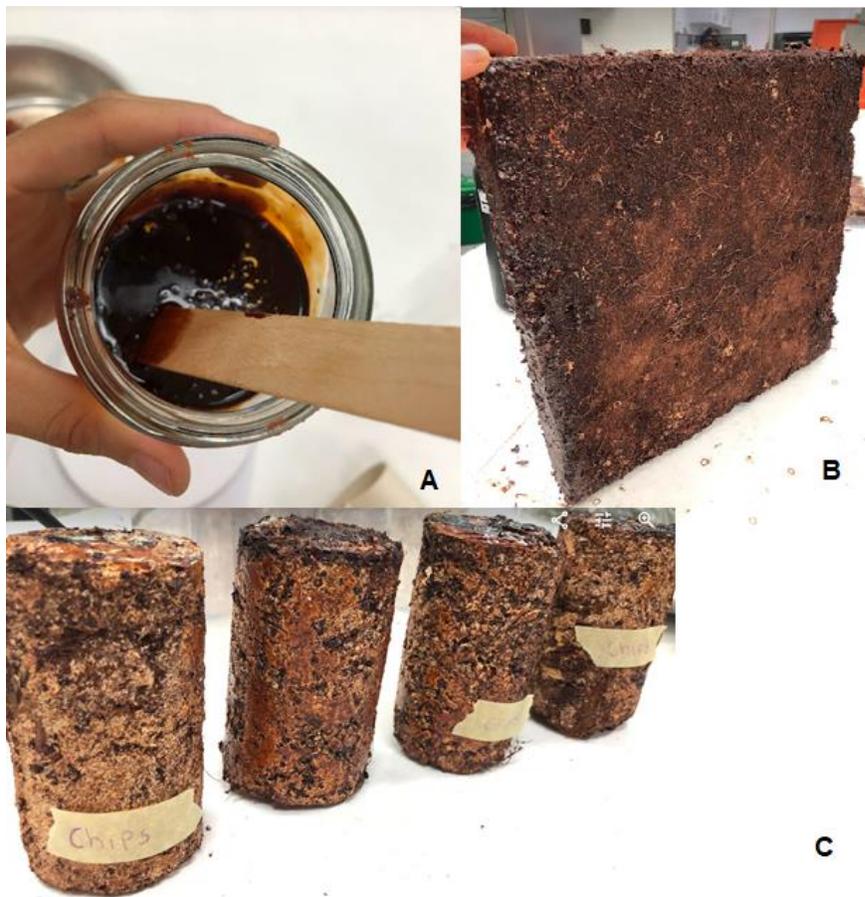


Figura 3-5 Recubrimiento tanino Quebracho. A: Preparación. B: Tanino sobre placa. C: Tanino sobre cilindros

Descripción del mortero de cal: Mortero constituido por 2 partes de arena de revoque, 1 parte de cal y 11/4 parte de agua.

En la Figura 3-6 se observa el recubrimiento con el mortero de cal aplicado sobre las muestras los cilindros, que corresponde a 8 muestras con el tratamiento, 4 para el sustrato con presencia de chips y 4 para el sustrato sin presencia de chips.



Figura 3-6 Recubrimiento - Mortero de cal sobre cilindros

Pruebas: Se realizó caracterización físico-mecánica en función del ensayo de compresión simple y de la determinación de la propiedad, conductividad térmica. Se realizaron pruebas adicionales para conocer el coeficiente de absorción acústica y el porcentaje de absorción de agua.

La Figura 3-7 ilustra la descripción la metodología del cultivo, donde se indica el procedimiento y las condiciones operacionales del proceso.

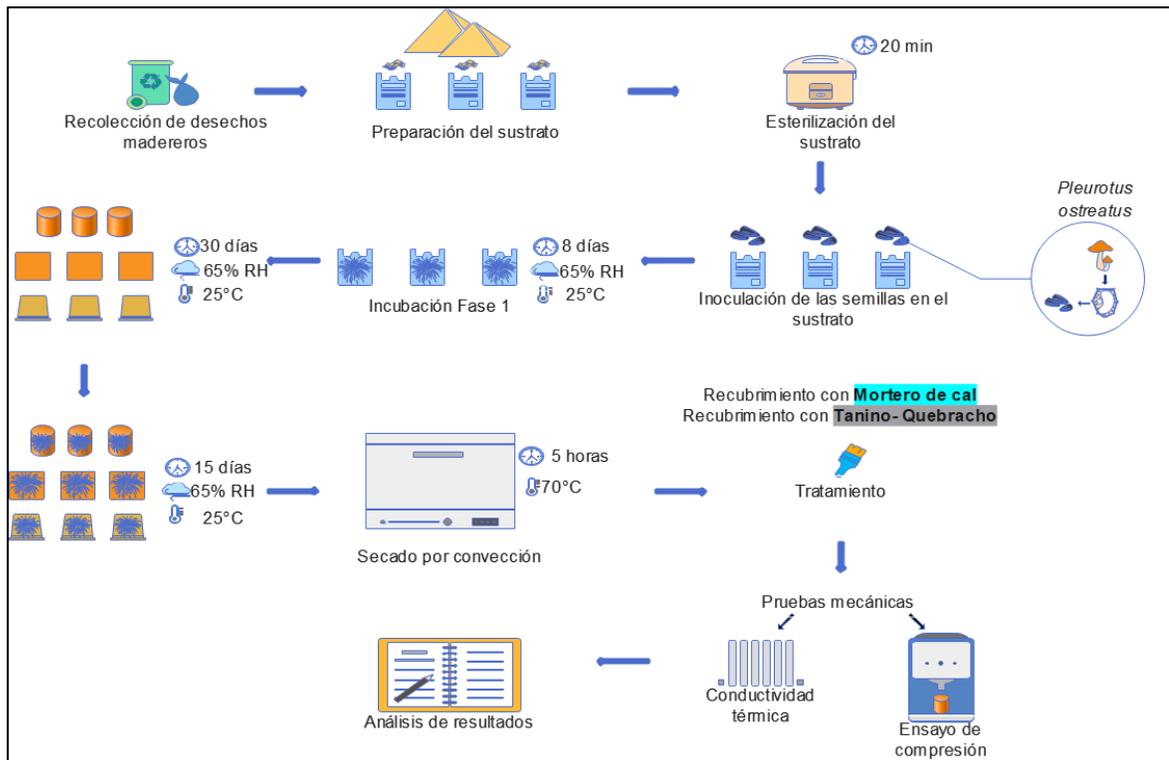


Figura 3-7 Metodología del cultivo del biomaterial (Fuente: Elaboración propia – Software Wondershare EdrawMax)

3.4 Caracterización del biomaterial

3.4.1 Ensayo de compresión simple

Para conocer la resistencia mecánica del biomaterial a base de micelio, se realiza un ensayo a compresión simple. Este ensayo consiste en someter la muestra cilíndrica a una carga axial para medir las deformaciones y obtener la fuerza que produce la falla. El procedimiento se realiza con base al método establecido por la norma ASTM D2166 (Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, 2014), Método de Ensayo para Resistencia a la compresión no confinada de Suelo Cohesivo, para determinar la resistencia a la compresión en condiciones de compresión, utilizando la

aplicación de una carga axial de deformación controlada. Dado que el biomaterial a base de micelio presenta cohesión, puede ser sometido a este tipo de ensayo para conocer una de sus propiedades mecánicas.

El procedimiento del ensayo consiste en ubicar la muestra cilíndrica en el centro del plato inferior de la prensa, luego se ajusta la celda de carga para que el plato superior apenas haga contacto con la muestra. Se configura la prensa para que ejerza la carga a una velocidad de 3 mm/min, velocidad acorde para materiales de tendencia plástica. Una vez se tiene el montaje, se ejecuta la prensa para producir una deformación axial. Se registran los valores de carga P de deformación con suficientes intervalos, para definir la forma de la curva tensión deformación.

Se continúa cargando hasta que los valores de carga disminuyan con el incremento de deformación, o hasta que alcance un 15% de deformación.

Para estimar la resistencia a la compresión se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde:

P : Carga aplicada

A : Área transversal

Área transversal dada por la ecuación

$$A = \frac{A_0}{1 - \frac{\varepsilon}{h}} \quad \text{Ec.(2)}$$

A_0 : Área transversal promedio inicial de la muestra

ε : Deformación axial para la carga dada

h : Altura de la muestra

3.4.2 Determinación de conductividad térmica (Método de la placa caliente)

La conductividad térmica k es una propiedad de transporte de calor. Indica la velocidad a la que se transfiere energía mediante un proceso de difusión que depende de la estructura

física, atómica y molecular del medio en que se transporta bajo un gradiente de temperatura. Es decir, cuando se tiene un flujo de calor y hay diferencia de temperatura, el calor aumenta con el incremento de la conductividad térmica (Incropera & De Witt, 1999).

Los aislantes térmicos están compuestos por materiales que tienen baja conductividad, por lo tanto, para conformar un sistema aislante, se combinan materiales de baja conductividad térmica, para obtener este parámetro con un valor aún más bajo (Incropera & De Witt, 1999).

De acuerdo a la literatura, los materiales a base de micelio presentan características aislantes, en ese sentido se determina el parámetro k , conductividad térmica, utilizando el método de la placa caliente, establecido en la norma C177 de la ASTM. (Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus 1, 2015). El desarrollo del método se describe a continuación:

El método de placa caliente, consiste en generar un flujo de calor unidireccional a través la conversión de energía eléctrica en energía térmica. El flujo de calor eléctrico se estima mediante la ecuación $Q = \Delta V I$, donde ΔV es la diferencia de potencial eléctrico, e I denota la intensidad de corriente eléctrica. La fuente de calor está conformada por una resistencia eléctrica ubicada entre dos placas metálicas en forma de sándwich.

El material de prueba se ubica en contacto con cada cara externa de la placa caliente para generar una distribución simétrica del calor. Se utilizan dos planos dispuestos en las caras externas de las muestras, que representan el sumidero o fuente fría y por último se tiene una guarda alrededor de la placa caliente para evitar fugas laterales de calor. En la Figura 3-8, se puede observar el montaje descrito.

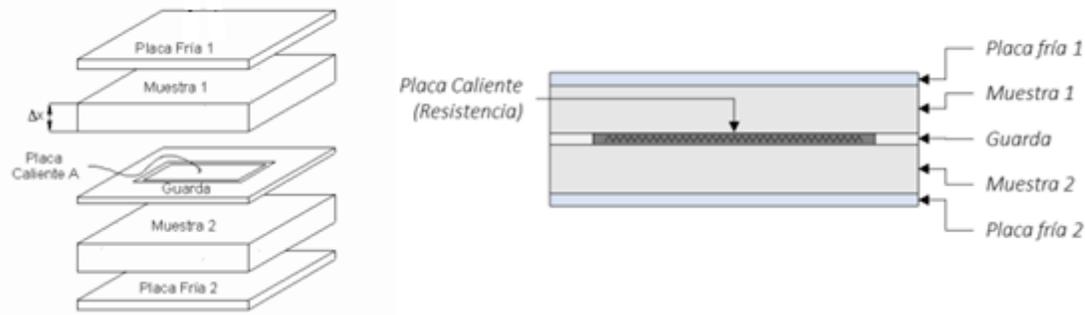


Figura 3-8 Montaje del método, placa caliente (Fuente: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus 1, 2015)

Para estimar la conductividad térmica se utiliza la Ec.(3), donde ΔV corresponde a la diferencia de potencial eléctrico en la resistencia, I es la intensidad de corriente que circula por la resistencia, Δx representa el espesor de la muestra, L representa la longitud de uno de los lados, y $(T_c - T_f)$ es la diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la cara fría.

$$\bar{k} = \frac{\Delta V \cdot I \cdot \Delta x}{L^2 (T_c - T_f)} \quad \text{Ec.(3)}$$

Instrumentación:

- Placa plana con resistencia eléctrica incrustada
- Guardas para método de placa caliente
- Placa enfriadora.
- Muestras a ensayar – 2 Placas 300x300 mm, espesor: 25 mm
- Reóstato.
- Controles termoelectrónicos de las guardas.
- Termopares
- Pinza volti-amperimétrica.

- Flexómetro.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Resultados ensayo de compresión simple

El resultado de la prueba a compresión simple corresponde a la deformación de la muestra como consecuencia a la carga axial aplicada a una velocidad constante de 3 mm/min. La resistencia es la variable de respuesta que se quiere analizar. Por lo tanto, el ensayo arroja valores netos carga y deformación por cada espécimen, acorde a los tratamientos que se especifican en la Tabla 3-4. Se tienen un total de 16 muestras para este ensayo, 8 para el recubrimiento con el mortero de cal y 8 para el recubrimiento de con el tanino (Quebracho).

Tabla 3-4 Cantidad de muestras - Ensayo a compresión (Fuente: Elaboración propia)

Recubrimiento	Mortero de cal		Tanino (Quebracho)	
	Chips	Sin Chips	Chips	Sin Chips
Sustrato				
N° de muestras	4	4	4	4
Muestras totales	16			

En la Figura 3-9, se muestra el montaje de la prueba para cada tipo de recubrimiento, utilizando la Prensa digital Master Loader 5030 donde el espécimen cultivado es colocado en el centro de la bandeja y luego comprimido mediante una carga axial. El montaje es realizado para todas las muestras con presencia y ausencia de chips.



Figura 3-9 Montaje ensayo a compresión – Recubrimiento quebracho y recubrimiento mortero de cal

En la Tabla 3-5 y en Tabla 3-6 se indican las características físicas como la geometría, el peso y la densidad de las muestras con y sin chips, para los recubrimientos quebracho y mortero de cal.

Tabla 3-5 Características físicas de las muestras - Recubrimiento – quebracho
(Fuente: Elaboración propia)

Tratamiento con quebracho						
Sustrato/chips	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Volumen (mm ³)	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)
1	55,00	100,00	2375,83	237582,94	67,90	285,79
2	56,00	101,50	2463,01	249995,38	65,87	263,48
3	58,00	100,00	2642,08	264207,94	71,36	270,09
4	56,00	99,00	2463,01	243837,86	65,79	269,81
Sustrato/sin chips						
1	55,00	105,00	2375,83	249462,09	62,80	251,74
2	56,00	100,00	2463,01	246300,86	56,57	229,68
3	57,00	102,00	2551,76	260279,38	60,45	232,25

4	57,00	98,00	2551,76	250072,35	63,96	255,77
---	-------	-------	---------	-----------	-------	--------

Tabla 3-6 Características físicas de las muestras - Recubrimiento - mortero de cal (Fuente: Elaboración propia)

Tratamiento: Recubrimiento con mortero de cal						
Sustrato/chips	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm²)	Volumen (mm³)	Peso (g)	Densidad (kg/m³)
1	59,00	100,00	2733,97	273397,10	105,02	384,13
2	56,50	100,00	2507,19	250718,73	108,70	433,55
3	61,00	99,00	2922,47	289324,19	103,96	359,32
4	57,50	103,00	2596,72	267462,44	94,45	353,13
Sustrato/sin chips						
1	56,00	101,10	2463,01	249010,17	84,40	338,94
2	58,50	105,00	2687,83	282222,03	105,02	372,12
3	60,00	106,00	2827,43	299707,94	116,81	389,75
	60,30	105,00	2855,78	299856,73	99,70	332,49

La densidad de las muestras no es homogénea, presenta valores parecidos para cada grupo de muestras. Esta diferencia se debe a falta de uniformidad en la manufactura de los cilindros, consecuencia de una compactación manual en cada cilindro que genera diferencias en los pesos y en las dimensiones.

En la Tabla 3-7 y en la Tabla 3-8, se incluye el módulo de elasticidad E como parámetro mecánico del material.

Tabla 3-7 Resultados deformación, esfuerzo, módulo de elasticidad - Recubrimiento mortero de Cal sin chips y con chips (Fuente: Elaboración propia)

% Def.	Muestra	Cal - sin chips			Cal- Chips			
		Def. Unitaria ϵ	Esfuerzo σ (kPa)	(E=σ/ϵ) (Mpa)	Muestra	Def. Unitaria ϵ	Esfuerzo σ (kPa)	(E=σ/ϵ) (Mpa)
2,50%	SCCM1	0,02	0,00		CCM1	0,02	29,31	1,29
	SCCM2	0,02	36,05	1,69	CCM2	0,02	5,85	0,27
	SCCM3	0,02	26,98	1,22	CCM3	0,02	20,08	0,91

	SCCM4	0,02	37,35	1,22	CCM4	0,02	22,24	1,06
5%	SCCM1	0,04	0,00		CCM1	0,05	54,14	1,20
	SCCM2	0,05	69,24	1,37	CCM2	0,05	28,57	0,63
	SCCM3	0,05	65,17	1,30	CCM3	0,04	49,03	1,09
	SCCM4	0,05	52,89	1,06	CCM4	0,05	37,66	0,75
10%	SCCM1	0,10	0,00		CCM1	0,10	70,91	0,72
	SCCM2	0,10	83,33	0,83	CCM2	0,10	39,61	0,41
	SCCM3	0,10	86,29	0,86	CCM3	0,10	79,91	0,81
	SCCM4	0,10	66,82	0,67	CCM4	0,10	53,62	0,53
15%	SCCM1	0,16	0,00		CCM1	0,15	79,55	0,53
	SCCM2	0,15	91,97	0,61	CCM2	0,15	52,79	0,34
	SCCM3	0,14	92,83	0,65	CCM3	0,14	91,98	0,64
	SCCM4	0,15	73,26	0,49	CCM4	0,15	91,98	0,42
20%	SCCM1	0,20	0,00		CCM1	0,00	77,22	0,40
	SCCM2	0,20	101,75	0,51	CCM2	0,19	54,94	0,34
	SCCM3	0,20	113,55	0,56	CCM3	0,19	95,62	0,64
	SCCM4	0,20	68,12	0,34	CCM4	0,20	65,28	0,42

**Tabla 3-8 Resultados deformación, esfuerzo, módulo de elasticidad -
Recubrimiento mortero de Quebracho sin chips y con chips
(Fuente: Elaboración propia)**

% Def.	Quebracho - sin chips				Quebracho - Chips			
	Muestra	Def. Unitaria ϵ	Esfuerzo σ (kPa)	($E=\sigma/\epsilon$) (Mpa)	Muestra	Def. Unitaria ϵ	Esfuerzo σ (kPa)	($E=\sigma/\epsilon$) (Mpa)
2,50%	SCM1	0,02	21,00	0,96	CCM1	0,00	0,00	
	SCM2	0,02	23,39	0,99	CCM2	0,00	0,00	
	SCM3	0,02	20,70	0,95	CCM3	0,02	21,04	0,86
	SCM4	0,02	29,47	1,26	CCM4	0,02	21,42	0,94
5%	SCM1	0,05	42,37	0,84	CCM1	0,00	0,00	
	SCM2	0,05	42,61	0,93	CCM2	0,00	0,00	
	SCM3	0,05	40,87	0,93	CCM3	0,05	39,57	0,80
	SCM4	0,05	52,33	1,13	CCM4	0,05	36,05	0,80
10%	SCM1	0,10	66,26	0,66	CCM1	0,00	0,00	
	SCM2	0,10	69,87	0,71	CCM2	0,00	0,00	
	SCM3	0,10	62,89	0,61	CCM3	0,10	71,92	0,72
	SCM4	0,10	79,83	0,81	CCM4	0,10	56,43	0,58
15%	SCM1	0,15	81,89	0,54	CCM1	0,14	67,00	
	SCM2	0,14	82,40	0,57	CCM2	0,00	87,07	
	SCM3	0,15	73,48	0,50	CCM3	0,14	92,53	0,65
	SCM4	0,15	96,02	0,63	CCM4	0,15	66,23	0,44
20%	SCM1	0,19	91,69	0,47	CCM1	0,00	0,00	
	SCM2	0,20	86,17	0,44	CCM2	0,00	0,00	
	SCM3	0,20	80,34	0,40	CCM3	0,19	107,23	0,56
	SCM4	0,20	98,97	0,50	CCM4	0,20	67,57	0,34

Las deformaciones de las muestras se observan en la Figura 3-10, la parte A muestra la deformación de la muestra M2 sin chips para el recubrimiento con quebracho, su forma de falla es aplastada con los bordes tangenciales deformados donde sobresalen bultos, también se observa una especie de fractura en la mitad de la muestra, sin embargo, es el desbordamiento que se sobrepone generando dicha grieta por el aumento la carga axial. En la parte B de la figura, se muestra una comparación entre dos muestras sin chips con el recubrimiento quebracho, una sin fallar y otra después del ensayo con una diferencia de altura de aproximadamente 3 cm. En C, se muestra la comparación de la deformación de dos especímenes con diferente recubrimiento, donde la muestra recubierta con el mortero

de cal se encuentra aplastada y con grietas y la muestra con quebracho evidencia aplastamiento, con los bordes abultados. La parte D, muestra la ejecución del ensayo en un espécimen recubierto con mortero de cal y por último en la parte E de la figura, se evidencia la deformación de las muestras sin chips con el recubrimiento con cal, debido a que el recubrimiento es superficial, este envuelve al aglomerado en forma semejante a una cáscara de huevo, mostrando fracturas en los bordes de los cilindros, distinto al comportamiento real del aglomerado, que se expande al comprimirse.



Figura 3-10 Deformación de muestras A: Montaje muestra sin chips – Quebracho. B: Deformación. C: Deformación según recubrimiento. D: Montaje muestra con chips – Cal. E: Deformación muestras sin chips – Cal.

La descripción anterior es representativa para todas las muestras de cilindros, para los diferentes grupos y sustratos, ya que las deformaciones fueron similares, debido a que el mecanismo de la prueba es constante.

La Figura 3-11, muestra la curva de los valores obtenidos de esfuerzo vs deformación para todas las muestras, para los dos tipos de sustratos y los dos tipos de recubrimiento.

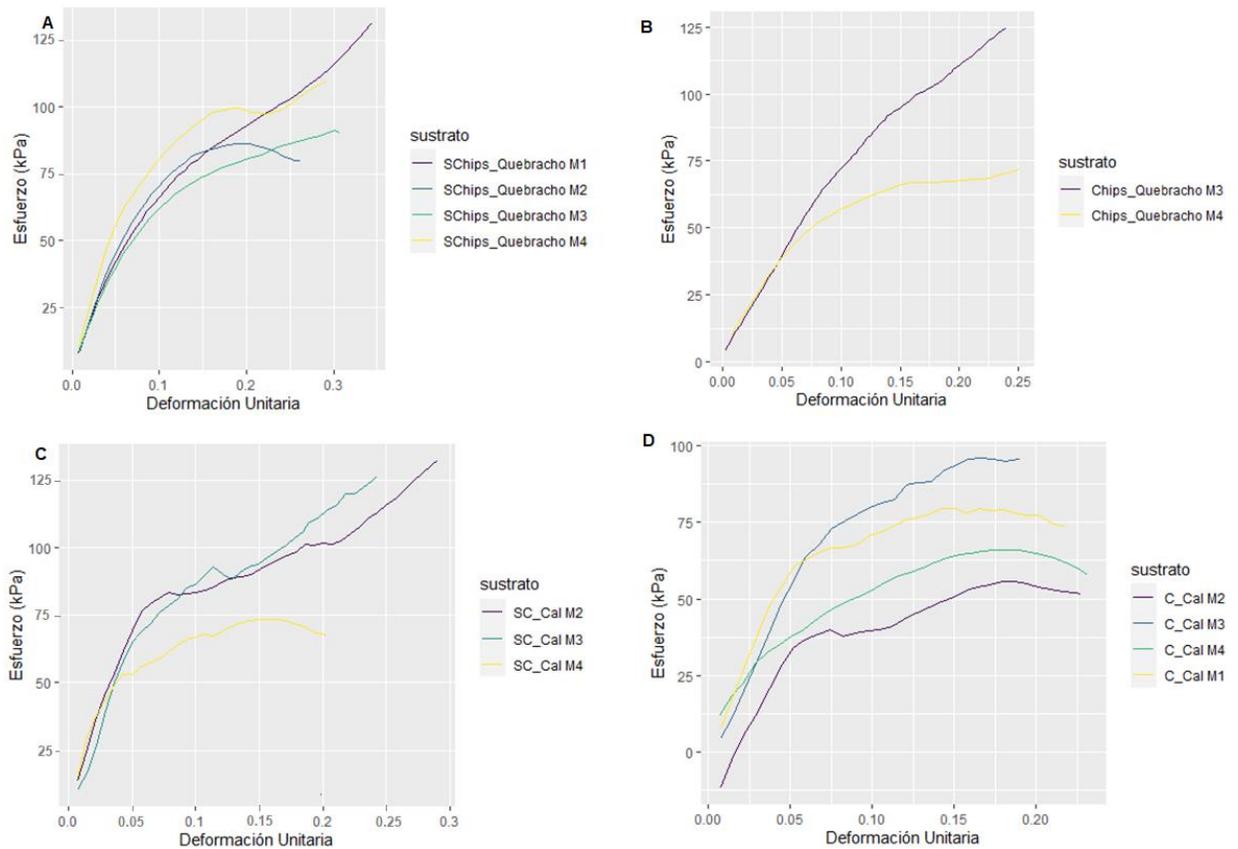


Figura 3-11 Esfuerzo Vs Deformación: A. Quebracho - Sin Chips B. Quebracho – Chips C. Cal - Sin Chips D. Cal - Chips

El comportamiento de las curvas evidencia una zona elástica hasta una deformación aproximadamente del 5%, donde el comportamiento de la curva es lineal y el material no queda deformado al detener la carga, es decir, presenta resistencia sin presentar deformación plástica. La deformación del 5% determina el límite entre la zona elástica y la zona plástica; al superar este valor, comienza el efecto de la curvatura, con una pendiente suave representando una deformación permanente, es decir, comportamiento plástico donde el material no regresa a su forma original. Del 5% hasta aproximadamente el 20% de la deformación, la curva se encuentra en la zona de endurecimiento y la deformación no es proporcional a la fuerza aplicada. Es importante anotar que no se precisa rotura inminente del material y se observa que las curvas pueden seguir en aumento. En términos generales todas las curvas presentan un comportamiento similar, con valores de esfuerzos dentro de un rango de 0 a 125 kPa, sin embargo, se tiene un leve aumento en el esfuerzo para las muestras sin chips, para ambos tipos de recubrimiento, efecto que puede estar

asociado a una mayor densidad en dichas muestras, dado que el volumen es uniforme; contrario a las muestras que contienen chips donde es probable una distribución no homogénea de los chips dentro del sustrato, generando vacíos y en consecuencia puntos débiles que afectan la resistencia.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Mediante el método estadístico, diseño experimental factorial, se analiza inicialmente las variables de la composición de la muestra del biomaterial, que corresponden al recubrimiento, sustrato, incluyendo la deformación dentro de los factores de interés sobre la resistencia o esfuerzo, variable de respuesta.

Cada factor presenta niveles donde su combinación permite una mejor comprensión de los resultados, se tiene factores fijos cualitativos y cuantitativos que determinan un valor de corridas que son analizadas en términos del esfuerzo. En la tabla Tabla 3-9 se indica el tipo de factor y su nivel.

La norma ASTM D2166 indica que para suelos plásticos la carga de rotura se toma cuando el espécimen se deforma un 15% de su altura, para este caso, que se tiene un material con un comportamiento similar, es viable considerar para términos de servicio, una deformación hasta el 20% de su altura, ya que para deformaciones superiores el material no es funcional. Por lo tanto, se integra a la deformación como variable que afecta la resistencia y se toma varios niveles de deformación para analizar la respuesta del biomaterial.

Tabla 3-9 Factores fijos - (Fuente: Elaboración propia)

Factor	Variable	Tipo	# de niveles	Niveles
α	Deformación	Cuantitativa	5	2,5%, 5%, 10%, 15%, 20%
β	Sustrato	Cualitativa	2	Con chips, Sin Chips
δ	Recubrimiento	Cualitativa	2	Cal, Tanino

Modelo estadístico y definición de hipótesis

El modelo estadístico de efectos fijos está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_h + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\delta)_{ih} + (\beta\delta)_{jh} + \epsilon_{ijk}$$

$$i=1,2,\dots,a; j=1,2,\dots,b; h=1,2,\dots,m \quad k=1,2,\dots,n$$

$$\epsilon_{ijk} \text{ NID}(0, \sigma^2)$$

Donde μ es la media general, α_i es el efecto debido al i -ésimo nivel del factor A, β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B, δ_h es el efecto del h -ésimo nivel del factor C, $(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\delta)_{ih}$ y $(\beta\delta)_{jh}$, representa la interacción en la combinación ijh y ϵ_{ijk} es el error aleatorio que supone una distribución normal con media cero y varianza constante σ^2 e independientes entre sí.

Para este modelo se tiene $a=5$, $b=2$, $m=2$ y $n=4$ réplicas

Las hipótesis en términos de los parámetros del modelo son:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$$

$$H_a: \alpha_i \neq 0 \text{ para algún } i$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0 \text{ para algún } j$$

$$H_0: \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_m = 0$$

$$H_a: \delta_h \neq 0 \text{ para algún } h$$

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } ij$$

$$H_a: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \text{ para algún } ij$$

$$H_0: (\alpha\delta)_{ih} = 0 \text{ para todo } ih$$

$$H_a: (\alpha\delta)_{ih} \neq 0 \text{ para algún } ih$$

$$H_0: (\beta\delta)_{jh} = 0 \text{ para todo } jh$$

$$H_a: (\beta\delta)_{jh} \neq 0 \text{ para algún } jh$$

Para probar las hipótesis se realiza un análisis de varianza (ANOVA), para el diseño factorial de la forma $a \times b \times m \times n$, donde es necesario descomponer la variación total

$$SST = SSA + SSB + SSC + SSAB + SSAC + SSBC + SSE$$

Los respectivos grados de libertad son:

$$(nabm-1)=(a-1)+(b-1)+(c-1)+(a-1)(b-1)+(a-1)(m-1) \\ +(b-1)(m-1)+ab(n-1)+am(n-1)+bm(n-1)$$

El total de observaciones es $N=n \times a \times b \times m$. La parte $(n-1)$ en los grados de libertad de la suma de cuadrados del error, señala que se necesitan dos o más réplicas para poder estimar el modelo vía ANOVA.

Utilizando el software estadístico R, se gráfica y ajusta los datos del modelo para obtener las curvas representadas en la Figura 3-12, donde se observa el esfuerzo que tiene el biomaterial asociado a cada nivel de deformación, 2.5%, 5%, 10%, 15% y 20%, para cada efecto de manera independiente, por lo tanto, se tienen valores medios del esfuerzo, agrupados en las variables “Deformación”, “Sustrato” y “Recubrimiento”.

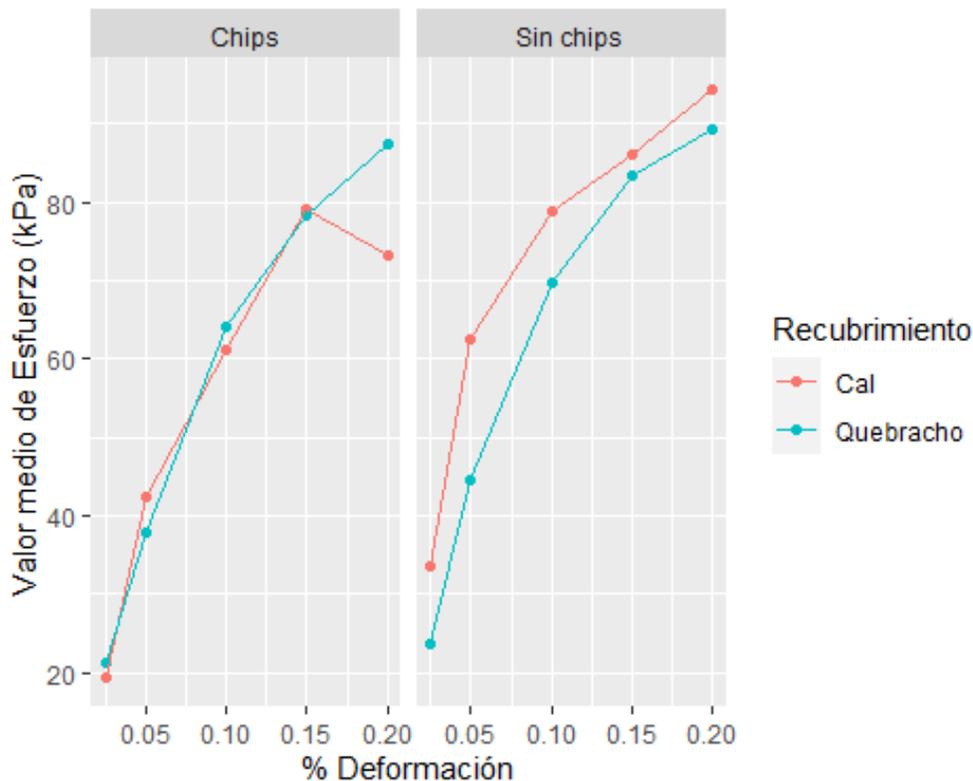


Figura 3-12 Esfuerzo - Deformación - Sustrato - Recubrimiento

Se observa la tendencia de los datos en forma de curva de acuerdo al comportamiento de los resultados del esfuerzo vs deformación para cada muestra como se describió

anteriormente, donde se reconoció la tendencia plástica del material. Se realiza una comparación del esfuerzo para ambos recubrimientos del material en ausencia y presencia de chips y se observa que la resistencia es mayor para todos los niveles de deformación, cuando se conforma el sustrato sin chips, aunque se encuentra superior cuando el material está recubierto por cal. La resistencia cuando el sustrato tiene chips se observa muy parecida ante cualquier recubrimiento, presentando una desviación cuando se tiene un 20% de deformación.

Como el comportamiento del material es plástico, donde la deformación no es proporcional a la carga, es decir, no se tiene una relación estrictamente lineal, es necesario considerar el efecto de la curvatura como primera valoración antes de realizar el cuadro ANOVA, por lo tanto, se eleva la deformación al cuadrado para obtener una ecuación polinómica que representa la curva.

Modelo ANOVA

En la Tabla 3-10, se presenta el análisis de varianza ANOVA. En el cuadro se indica el resultado del cálculo para el modelo de la curva descrita anteriormente, especificando el Esfuerzo como variable de respuesta bajo el efecto de las variables Sustrato, Recubrimiento, Deformación y Deformación al cuadrado (DD), verificando las interacciones entre ellas para comprobar su significancia.

Tabla 3-10 Cuadro ANOVA (Fuente: Elaboración propia)

Cuadro ANOVA (Test tipo III)					
	Suma de cuadrado	Grados de libertad	Valor F	Pr(>F)	Significancia
Intercepto	0,1	1	0,0009	0,976	No es significativo
Recubrimiento	0,3	1	0,0017	0,9673	No es significativo
Sustrato	5,8	1	0,038	0,8463	No es significativo
Deformación	238,1	1	1,5614	0,2172	No es significativo
DD	13,5	1	0,0887	0,7671	No es significativo
Recubrimiento: Sustrato	1,4	1	0,0093	0,9235	No es significativo

Recubrimiento: Deformación	0,7	1	0,0045	0,9466	No es significativo
Sustrato: Deformación	138,9	1	0,911	0,3443	No es significativo
Recubrimiento: DD	2,7	1	0,0174	0,8955	No es significativo
Sustrato: DD	172,2	1	1,1293	0,2929	No es significativo
Deformación: DD	1,5	1	0,0101	0,9204	No es significativo
Recubrimiento: Sustrato: Deformación	40,0	1	0,2624	0,6107	No es significativo
Recubrimiento: Sustrato: DD	59,6	1	0,3906	0,5348	No es significativo
Recubrimiento: Deformación: DD	7,8	1	0,0514	0,8216	No es significativo
Sustrato: Deformación: DD	193,2	1	1,2665	0,2657	No es significativo
Recubrimiento: Sustrato: Deformación: DD	75,6	1	0,4956	0,4847	No es significativo
Residuales	7777,7	51			

De acuerdo a las hipótesis establecidas para un nivel de significancia $\alpha = 5\%$, el resultado del cuadro ANOVA arroja la probabilidad, valor-p, de todos efectos e interacciones entre ellos en relación a la variable de respuesta. Los resultados no evidencian significancia puntual, por lo tanto, se extrae de manera paulatina los efectos que no son significativos para que la varianza se redistribuya en los demás factores y finalmente se obtenga un modelo ANOVA de mejor precisión.

En el Anexo 1 se indican los resultados de la operatividad en software R.

La extracción de los efectos e interacciones que no son significativas se realiza en el siguiente orden

- Extracción de interacción: Recubrimiento – Sustrato -Deformación – Deformación al cuadrado DD, con $P=0,4847$
- Extracción de interacción: Recubrimiento- Deformación – Deformación al cuadrado, con $P=0,68306$
- Extracción de interacción: Recubrimiento – Sustrato – Deformación, con $P=0,59340$
- Extracción de interacción: Recubrimiento – Sustrato – DD, con $P=0,86033$
- Extracción de interacción: Sustrato – Deformación– DD, con $P=0,41202$

En la Tabla 3-11, al redistribuir la varianza eliminando las interacciones no significativas, se empieza a evidenciar los efectos que sí son significativos como la deformación, indicados en el cuadro ANOVA.

Tabla 3-11 Cuadro ANOVA – Ajuste (Fuente: Elaboración propia)

Cuadro ANOVA (Test tipo III)					
	Suma de cuadrado	Grados de libertad	F value	Pr(>F)	Significancia
Intercepto	57,1	1	0,4127	0,5232	No es significativo
Recubrimiento	0,0	1	0,0000	0,9989	No es significativo
Sustrato	2201,0	1	15,9046	0,0002	Muy significativo
Deformación	1480,0	1	10,6931	0,0018	Significativo
DD	385,8	1	2,7874	0,1004	No es significativo
Recubrimiento: Sustrato	541,4	1	3,9118	0,0527	No es significativo
Recubrimiento: Deformación	4,5	1	0,0322	0,8582	No es significativo
Recubrimiento: DD	31,9	1	0,2304	0,6330	No es significativo
Deformación: DD	135,0	1	0,9752	0,3275	No es significativo
Residuales	8027,4	58			

Se continúa con la extracción de la interacción de dos factores, con el valor-p más alto.

- Extracción de interacción: Sustrato - DD, con P =0,908533
- Extracción de interacción: Recubrimiento - Deformación, con P =0,858175
- Extracción de interacción: Deformación - DD, con P =0,1553041
- Extracción de interacción: Recubrimiento - DD, con P =0,1605917
- Extracción de interacción: Recubrimiento - Sustrato, con P =0,055678

Una vez realizada la extracción de las interacciones no significativas, se continúa ajustando el modelo ANOVA, extrayendo el efecto de la variable recubrimiento, que no es significativo para la variable de respuesta. En la Tabla 3-12 se evidencia probabilidad significativa en

las variables Sustrato, Deformación y Deformación al cuadrado, lo que indica que tienen un efecto en relación al esfuerzo.

Tabla 3-12 Cuadro ANOVA – Significativo (Fuente: Elaboración propia)

Cuadro ANOVA (Test tipo III)					
	Suma de cuadrado	Grados de libertad	F value	Pr(>F)	Significancia
Intercepto	2,7	1	0,0183	0,892744	
Sustrato	1659,8	1	11,3979	0,001264	Significativa
Deformación	9312,5	1	63,9503	3,61E-11	Muy Significativa
DD	3619,7	1	24,8566	5,12E-06	Muy significativa
Residuales	9174,1	63			

Del cuadro ANOVA ajustado, se observa que el tipo de sustrato y la deformación representan un efecto en la variable de respuesta, Esfuerzo, el recubrimiento y las interacciones entre las variables, no demuestran un efecto probable estadísticamente respecto al esfuerzo. Para asegurar este a resultado y validar las conclusiones del modelo ANOVA se debe comprobar normalidad, independencia y homocedasticidad de los datos.

La distribución de los datos es normal, cuando se distribuyen a rededor de la media. Se realiza un gráfico de probabilidad normal para observar la distribución de los datos y se calcula el estadístico de prueba de Shapiro-Wilk donde el valor-p debe ser mayor a 0,05

En la Figura 3-13 se indica el gráfico de distribución normal de los residuos del modelo ANOVA ajustado. Donde el Eje x representa los cuantiles teóricos y el Eje y representa los cuantiles observados. Se observa que los datos están alrededor de la línea central, media, infiriendo que hay normalidad en el modelo.

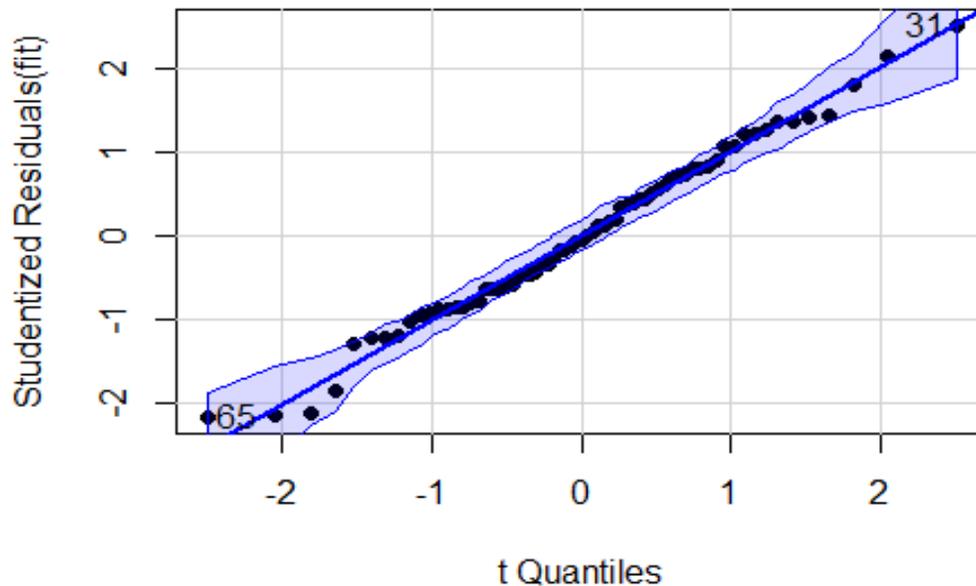


Figura 3-13 Distribución normal

Al realizar el estadístico de prueba de Shapiro Wilk se obtiene el valor-p igual a 0,7569 mayor a 0.05, por lo tanto, no se rechaza hipótesis nula de normalidad y el modelo ajustado del ANOVA cumple con el supuesto de distribución normal.

Ahora se comprueba el supuesto de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas, donde la variabilidad de los datos de los grupos debe ser constante en todos los niveles del factor. Para comprobar este supuesto se utiliza un gráfico de dispersión y se calcula el estadístico de prueba de Bartlett.

El estadístico de prueba de Bartlett arroja un valor-p igual a 0,06641 mayor a 0,05, por lo tanto, se concluye que hay homocedasticidad. En la Figura 3-14 se muestra la dispersión de los residuales, que representa una variabilidad constante de la diferencia entre valores observados y valores predichos a largo de los valores predictivos.

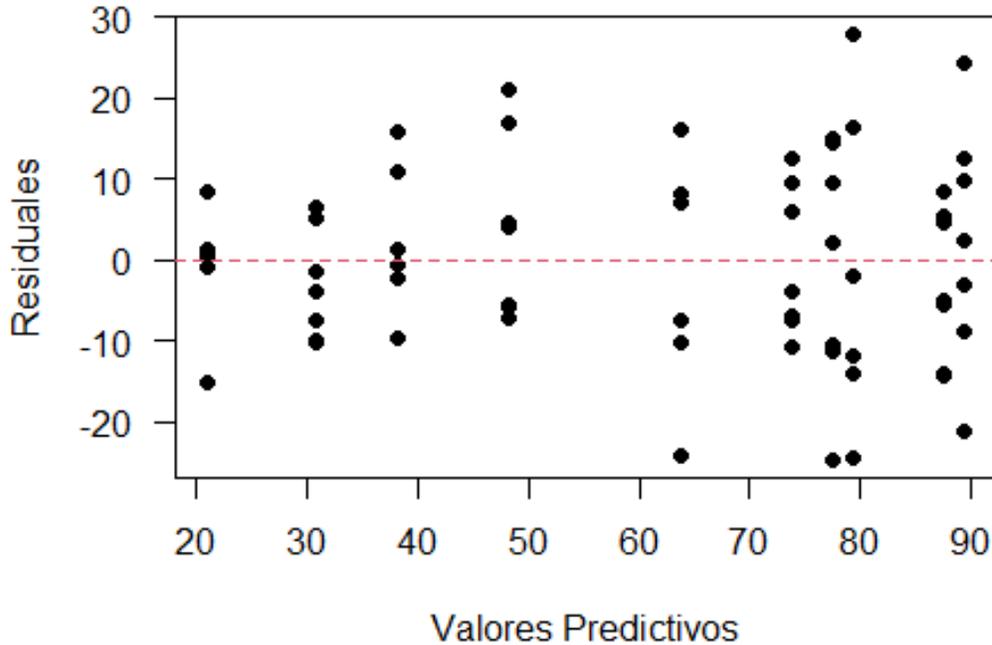


Figura 3-14 Homogeneidad de varianza

El resultado estadístico demuestra que el esfuerzo del biomaterial es afectado por la deformación y por el sustrato ante la presencia o ausencia de chips, sin embargo, se ajusta nuevamente el modelo para no tener en cuenta el intercepto, dado que, a un esfuerzo de 0 kPa, no se tienen deformaciones.

En la Tabla 3-13, muestra el resultado del modelo realizado con regresión lineal, basado en las variables predictoras “Sustrato” y “Deformación” para estimar el “Esfuerzo”, donde se obtienen los coeficientes de regresión, los errores, los valores t y p y su significancia.

Tabla 3-13 Modelo de regresión lineal (Fuente: Elaboración propia)

Factores	Coefficientes	Error	t-value	P> t	Significancia
Deformación: Sustrato Chips	896,93	71,09	12,62	2,00E-16	Muy significativo
Deformación: Sustrato sin Chips	1072,57	66,89	16,03	2,00E-16	Muy significativo
Sustrato Chips: DD	-2528,13	419,96	-6,02	9.82e-08	Muy significativo
Sustrato sin Chips: DD	-3152,83	391,05	-8,06	2.77e-11	Muy significativo

El coeficiente R^2 es de aproximadamente del 97%, indicando que el modelo es confiable.

El modelo se reescribe para concluir la respuesta del biomaterial desde un enfoque predictivo, obteniendo la ecuación de la curva que determina la resistencia ante un valor aleatorio de deformación para cualquiera de los dos tipos de sustratos.

Para validar el modelo anterior, se comprueban nuevamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad, para proceder con la obtención de la ecuación del modelo predictivo. La prueba de normalidad con el test de Shapiro-Wilk, se obtiene valor-p = 0,1275 mayor a 0,05, por lo tanto, el modelo ajustado cumple con el supuesto de normalidad y gráficamente en la Figura 3-15, se observa que los datos residuales están alrededor de la media.

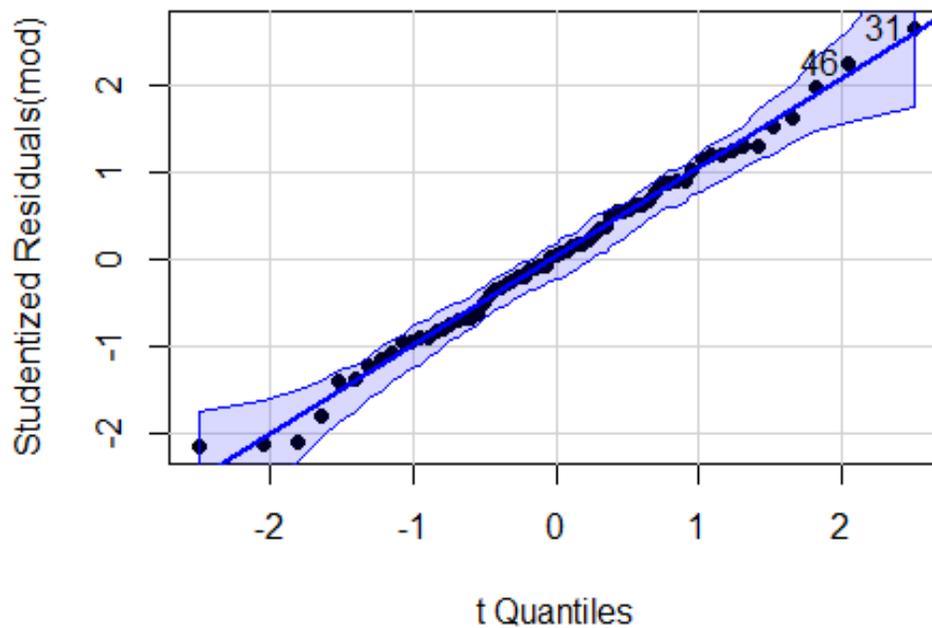


Figura 3-15 Distribución normal, modelo ajustado

El supuesto de homocedasticidad, se realiza con la prueba de Bartlett, donde el valor-p = 0,082 es mayor a 0,05, por lo tanto, existe homogeneidad de varianzas. La Figura 3-16 verifica el supuesto de homocedasticidad, donde la variabilidad de los datos es constante ante los valores predictivos.

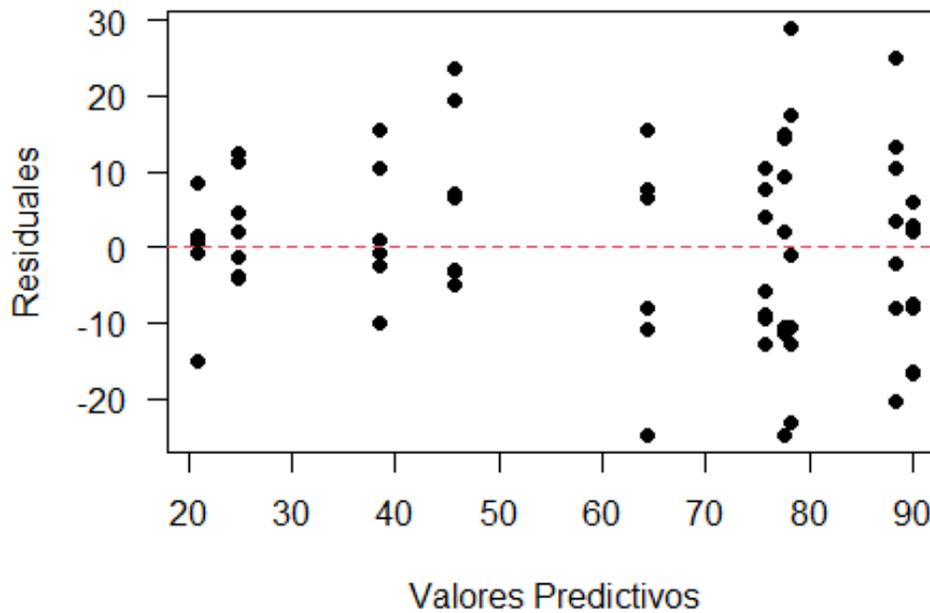


Figura 3-16 Homogeneidad de varianzas, modelo ajustado

Una vez validado el modelo ajustado, se concluye que el esfuerzo o capacidad a compresión del biomaterial desarrollado bajo las condiciones indicadas, evidencia mediante el análisis estadístico una variación ante la presencia y ausencia de chips. Para el caso del recubrimiento no es significativo este tratamiento en la resistencia del material, por lo tanto, puede considerarse para un efecto estético o para proteger al material es su manipulación.

La siguiente ecuación representa la curva del modelo predictivo que estima la capacidad del biomaterial cuando se conforma el sustrato con y sin chips, para una determinada deformación, tomando los coeficientes β_1 , β_2 , β_3 y β_4 del modelo ajustado. La representación gráfica del modelo predictivo se muestra en la Figura 3-17.

$$y = \beta_1 Dc + \beta_2 Ds + \beta_3 D^2 c + \beta_4 D^2 s$$

$$y = 896.93 Dc + 1072.57 Ds - 2528.13 D^2 c - 3152.83 D^2 s$$

Donde

y : Predicción del esfuerzo

Dc : Deformación con chips

Ds : Deformación sin chips

D^2c : Deformación² con chips

D^2s : Deformación² sin chips

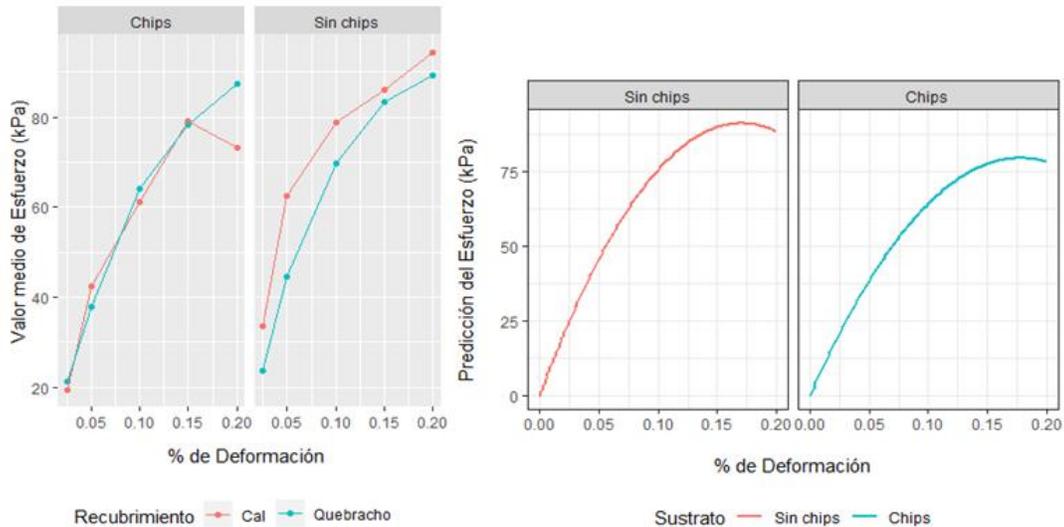


Figura 3-17 Esfuerzo medio de datos experimentales Vs Esfuerzo modelo predictivo

El modelo predictivo tiene como función estimar la resistencia del biomaterial en relación a una deformación aplicada, puede ayudar a realizar elecciones en términos del sustrato para un determinado uso. En la figura anterior, se compara el esfuerzo de los datos experimentales en forma de media y el esfuerzo del modelo predictivo. Se evidencia en ambos casos mayor resistencia sin la presencia de chips respecto al sustrato con chips. El modelo ajustado presenta un comportamiento definido en forma de curvatura, donde puede leerse esfuerzos puntuales a una determinada deformación, contrario a la gráfica de los datos experimentales donde el tipo de recubrimiento genera imprecisión y no aporta resistencia.

3.5.2 Resultados de la determinación de la conductividad térmica

De acuerdo al montaje de la Figura 3-8 Montaje del método, placa caliente y la Figura 3-18, cuando se alcanza un equilibrio térmico y se establece la temperatura a una potencia dada, sin que varíe más de 5°C los valores arrojados por los 4 termopares, se realizan las

mediciones de los parámetros de la ecuación de la conductividad térmica, para proceder con el cálculo.

La muestra de biomaterial utilizada en este ensayo, corresponde a dos placas de 30x30 cm con 2.5 cm de espesor, cultivadas como se indica en la Figura 3-7 Metodología del cultivo del biomaterial.

En la Figura 3-18 se identifica el montaje del ensayo de conductividad térmica mediante el método placas calientes, se observa la placa cultivada (biomaterial), la placa caliente, los termopares conectados a la placa, y se observa la guarda, que corresponde al marco de madera, para mantener hermético el sistema y evitar fuga de calor.

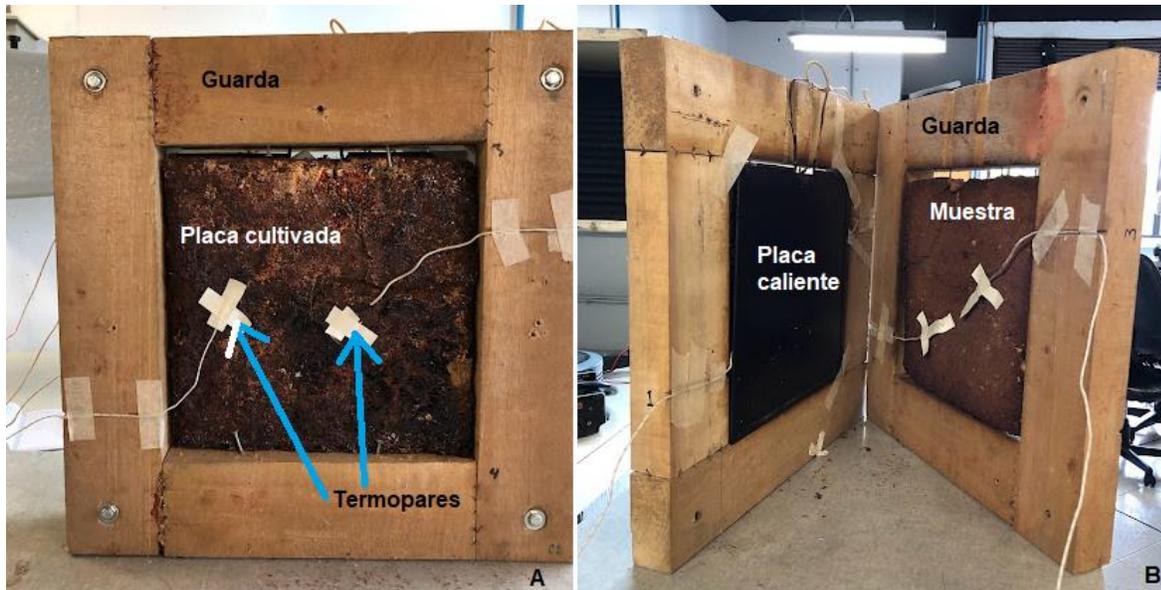


Figura 3-18 Partes del montaje – ensayo de conductividad térmica

En la Figura 3-19, se muestra el montaje del sistema placas calientes en funcionamiento, donde las dos muestras están contenidas por las guardas de madera y entre ellas se encuentra la placa caliente que transmite el calor, los termopares se conectan a las caras externas e internas de las placas y para sellar el sistema, se utilizan dos placas frías en cada lado para que aíslen el material. En los termómetros se indican las temperaturas en °C, que corresponde a 4 lecturas para los termopares internos y 4 lecturas para los termopares externos.

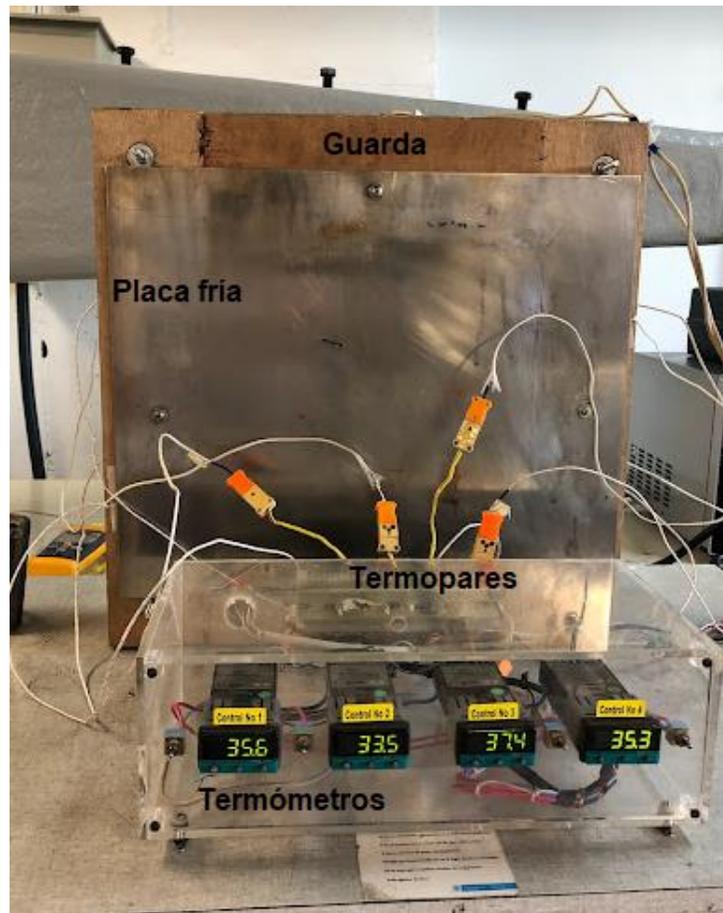


Figura 3-19 Montaje del sistema placa caliente en funcionamiento

En la Tabla 3-14, se indica la temperatura de las placas obtenida mediante termopares conectados a las caras externas e internas de las mismas; el valor de la temperatura final corresponde al promedio de las lecturas. Las temperaturas de las placas están asociadas a la corriente y al voltaje; valores necesarios para obtener el valor de la conductividad térmica k y analizar su magnitud.

Tabla 3-14 Lectura de temperatura, corriente y voltaje (Fuente: Elaboración propia)

Temperatura en placas	1	2	3	4	Prom. (°C)	Voltaje ΔV (V)	Corriente I (A)
Cara interna T_c (°C)	40,10	40,00	39,60	39,20	39,73	15,80	0,33
Cara externa T_f (°C)	30,50	30,40	30,60	31,00	30,63		

En la Tabla 3-15, se indican las mediciones de la geometría de las placas, donde se mide la longitud de los lados y espesor.

Tabla 3-15 Geometría de las placas (Fuente: Elaboración propia)

Dimensión/Medición	1	2	3	4	Promedio
Lado 1 (m)	0,293	0,289	0,292	0,291	0,291
Lado 2 (m)	0,294	0,295	0,293	0,293	0,294
Espesor (m)	0,025	0,023	0,026	0,025	0,025

En la Tabla 3-16, se indica el cálculo de la conductividad térmica k para una temperatura promedio de 35°C, temperatura acorde al alcance del biomaterial dentro del campo de la construcción.

Tabla 3-16 Cálculo de la conductividad térmica k (Fuente: Elaboración propia)

Voltaje ΔV (V)	Corriente I (A)	Prom T. Int Tc (°C)	Prom T.ext Tf (°C)	Delta Tem (°C)	Lado 1 (m)	Lado 2 (m)	Espesor ΔV (m)	Cond Térmica (W/mK)
15,8	0,33	39,73	30,63	9,10	0,291	0,294	0,025	K1 0,08283

Para que el valor calculado de la conductividad térmica tenga validez, debe calcularse la incertidumbre asociada a cada medida experimental de las variables de la Ec.(3) y posteriormente calcular la incertidumbre de la conductividad térmica. En la Tabla 3-17, se indica el cálculo de la incertidumbre de las mediciones directas, que corresponde a la incertidumbre de la toma de datos de la temperatura, voltaje, corriente y geometría de la placa, se realiza con base en la resolución de cada instrumento con el que se ejecuta cada medición.

Tabla 3-17 Resolución del instrumento (Fuente: Elaboración propia)

Variable	Instrumento	Resolución	Unidad
Diferencia de temperatura	Termopar	0,1	°C
Longitud de la placa	Flexómetro	0,001	m
Espesor de la placa	Pie de rey	0,00005	m

Diferencia de potencial	Pinza voltiamperimétrica	0,1	v
Intensidad de corriente	Pinza voltiamperimétrica	0,01	A

Se utiliza el método matemático propagación de errores para estimar la incertidumbre de cada variable de entrada a través de la función matemática de la conductividad térmica y así obtener la incertidumbre. Se calcula la derivada parcial de la Ec.(3), que representa la tasa de cambio de la función respecto a cada variable.

La propagación de errores se determina con la Ec.(4) que corresponde a la incertidumbre estándar combinada u_R como resultado de la suma vectorial de cada uno de las variaciones de la función de interés en relación a cada una de las variables. En este caso se expresa como función R, donde las variaciones u_i en sus variables, genera una variación en R, denotada como u_{R_i} .

$$u_R = (u_{R_1}^2 + u_{R_2}^2 + \dots + u_{R_n}^2)^{1/2} \quad \text{Ec.(4)}$$

$$u_{R_i} = \frac{\partial R \cdot (x_1, x_2 \dots x_n)}{\partial x_i} \cdot u_{x_i} \quad \text{Ec.(5)}$$

Los términos $\partial R/\partial x_i$, son los coeficientes de sensibilidad c_i obtenidos de las derivadas parciales de la función de la conductividad térmica, por lo tanto, reescribiendo la Ec.(5) se tiene la ecuación para el cálculo de la incertidumbre de cada variable:

$$u_{R_i} = c_i \cdot u_{x_i} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde

u_{x_i} : Resolución de cada instrumento de medición

u_{R_i} : Incertidumbre

En la Figura 3-20 se esquematiza mediante la espina de pescado, las fuentes de incertidumbre, donde la sumatoria vectorial representa la incertidumbre total del modelo.

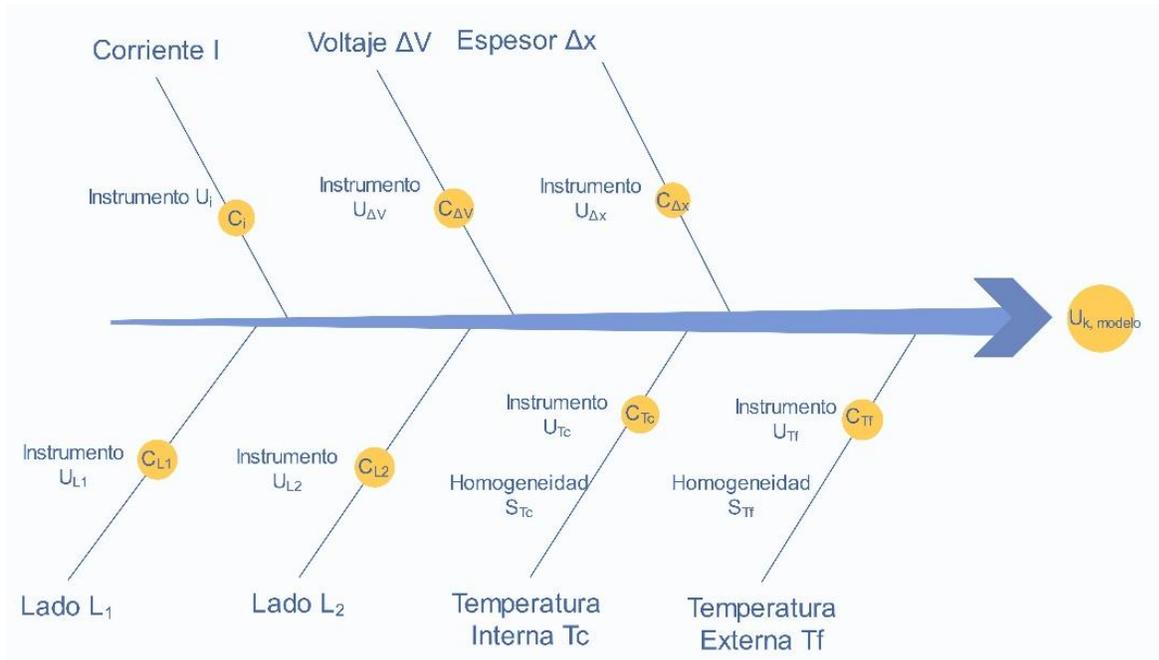


Figura 3-20 Espina de pescado, incertidumbres de k (Fuente: Elaboración propia)

Al tener varias lecturas de la temperatura, resulta necesario considerar la variabilidad de las mediciones como fuente de incertidumbre, por lo tanto, la incertidumbre de la temperatura se debe a la incertidumbre del instrumento más la desviación estándar de la medición. Los cálculos son realizados de acuerdo a Ec.(7) y Ec.(8), respectivamente.

$$u_{T_{c,f}}^2 = (u_{T_{c,f}} \text{Instrumento})^2 + (S_{T_{c,f}})^2 \quad \text{Ec.(7)}$$

$$S_{T_{c,f}} = \sqrt{\frac{1}{4-1} \sum_{j=1}^4 (\bar{T}_{c,f} - T_{c,f;j})^2} \quad \text{Ec.(8)}$$

Donde

$u_{T_{c,f}}$: Incertidumbre de la temperatura en las caras internas y externas.

$S_{T_{c,f}}$: Desviación estándar

$\bar{T}_{c,f}$: Media de temperatura, externas e internas

$u_{T_{c,f}} \text{Instrumento}$: Incertidumbre del instrumento

En la Tabla 3-18 y Tabla 3-19, se indica el cálculo de la desviación estándar y la incertidumbre para la temperatura, respectivamente.

Tabla 3-18 Desviación estándar de la Temperatura (Fuente: Elaboración propia)

Temperatura en placas	1	2	3	4	Prom	S_{T_c}
Cara interna Tc (°C)	40,10	40,00	39,60	39,20	39,73	0,4113
Cara externa Tf (°C)	30,50	30,40	30,60	31,00	30,63	0,2630

Tabla 3-19 Incertidumbre para la temperatura (Fuente: Elaboración propia)

Incertidumbre del instrumento	u_{T_c}	u_{T_f}
0,1	0,4233	0,2814

En la Tabla 3-20 se indica el cálculo de las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad c_i respecto a cada variable de la función de la conductividad térmica, donde se deriva la variable de interés y las otras variables quedan constantes.

Tabla 3-20 Coeficientes de sensibilidad (Fuente: Elaboración propia)

Corriente c_I	Diferencia de potencia $c_{\Delta V}$	T. Interna c_{T_c}	T. Externa c_{T_f}	Lado L1 c_{L1}	Lado L2 c_{L2}	Espesor $c_{\Delta x}$
dR/dI	$dR/d\Delta V$	dR/dT_c	dR/dT_f	$dR/dL1$	$dR/dL2$	$dR/d\Delta x$
0,2510	0,0052	-0,0091	0,0091	-0,2848	-0,2821	3,3544

En la Tabla 3-21, se indica el cálculo de la incertidumbre estándar combinada como la sumatoria de las incertidumbres asociadas a cada medición de las variables asociadas a la Ec.(3).

Tabla 3-21 Incertidumbre combinada estándar (Fuente: Elaboración propia)

$\frac{dR}{dI} u_I$	$\frac{dR}{d\Delta V} u_{\Delta V}$	$\frac{dR}{dT_c} u_{T_c}$	$\frac{dR}{dT_f} u_{T_f}$	$\frac{dR}{dL_1} u_{L_1}$	$\frac{dR}{dL_2} u_{L_2}$	$\frac{dR}{d\Delta x} u_{\Delta x}$	u_R
0,00251	0,00052	-0,00385	0,00256	-0,00028	-0,00028	0,00017	0,00531

Una vez obtenida la incertidumbre estándar, se calcula la incertidumbre expandida U_R para un intervalo del 95% de confianza, mediante la multiplicación de la incertidumbre estándar por un factor de cobertura igual a 2 asociado a una distribución normal, como se expresa en la Ec.(9)

$$U_R = K_{cobertura} \cdot u_R \quad \text{Ec.(9)}$$

En la Tabla 3-22, se indica el resultado final de la conductividad térmica del biomaterial para un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 3-22 Conductividad térmica del biomaterial (Fuente: Elaboración propia)

	Cond Térmica (W/mK)		U_R	%Error
K1	0,08283	±	0,01061	12,81

El valor de la conductividad térmica obtenido, puede compararse con valores de k de materiales que se utilizan como aislantes térmicos en el campo de la construcción. En la Tabla 3-23 se muestran valores de conductividad térmica k para estos materiales aislantes a una temperatura de 27°C. El rango de valores para el k del biomaterial, se encuentra entre 0,027 hasta 0,17 W/mK, valores aceptados con propiedades aislantes (Incropera et al., 2007).

Tabla 3-23 Conductividad térmica de materiales aislantes térmicos usados en construcción (Fuente: Elaboración propia a partir de Incropera et al., 2007)

Material	Densidad kg/m³	Cond. Térmica k W/mK
Madera prensada	640	0,094
Madera prensada alta densidad	1010	0,15
Tablero de partículas, alta densidad	1000	0,17
Tablero de partículas, baja densidad	590	0,078
Maderas duras (roble, arce)	720	0,16
Maderas blandas (abeto, pino)	510	0,12
Fibra de vidrio	105	0,036

poliestireno expandido estirado	55	0,027
poliestireno expandido moldeado	16	0,04
Poliuretano	30	0,028
Fibras minerales	265	0,049
Corcho	120	0,039
Madera triturada/cementada	350	0,087
Placa de Biomaterial de micelio a 35°C	243	0,082

La baja conductividad térmica del material a base de micelio y residuos madereros se debe a distintas variables como, la composición y la estructura. El material durante su proceso de crecimiento fue compactado manualmente para emparejar el material y homogenizar la superficie, lo cual tiene un efecto en el aumento de la densidad, reflejando una reducción de vacíos. Cuando hay presencia de vacíos, las partículas del material tienen menos interacción entre ellas, limitando la transferencia de calor. Lo anterior puede observarse en la Figura 3-21, donde a mayor densidad, el valor de k aumenta.

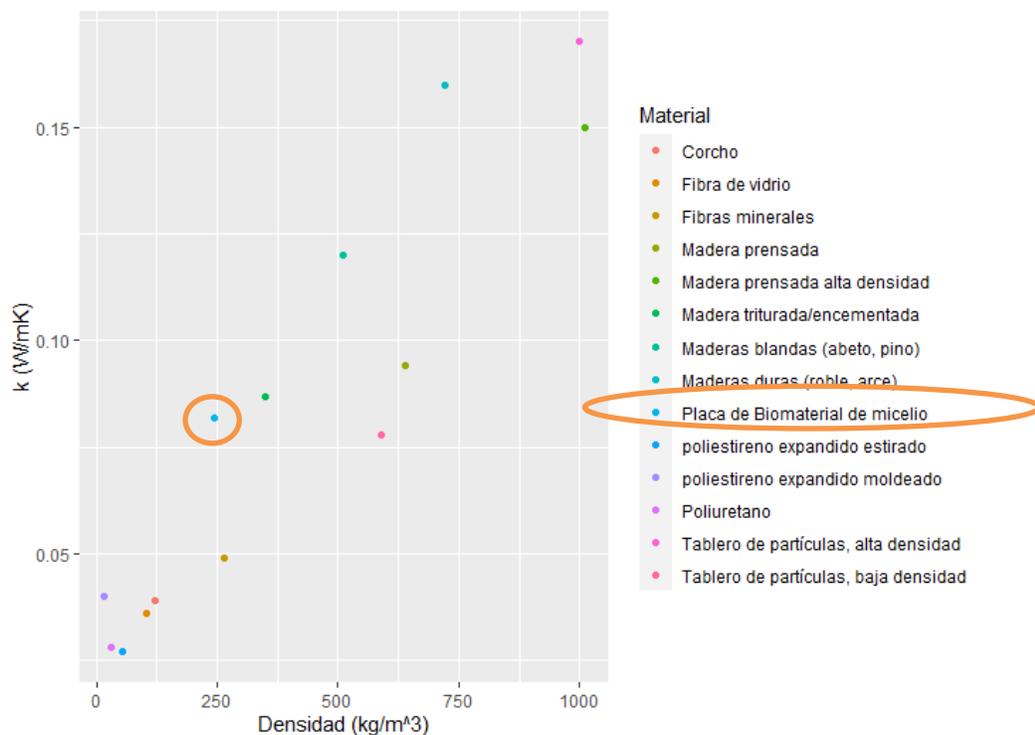


Figura 3-21 Conductividad térmica en materiales (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3-22 puede verse la conductividad térmica para diferentes estados de la materia, pero inclusive también se encuentra la conductividad térmica para sistemas aislantes con valores superiores a 0,01 e inferiores a 1,0 W/mK. Puede verse que el biomaterial presenta un valor de k dentro de este rango, lo que valida su uso como aislante.

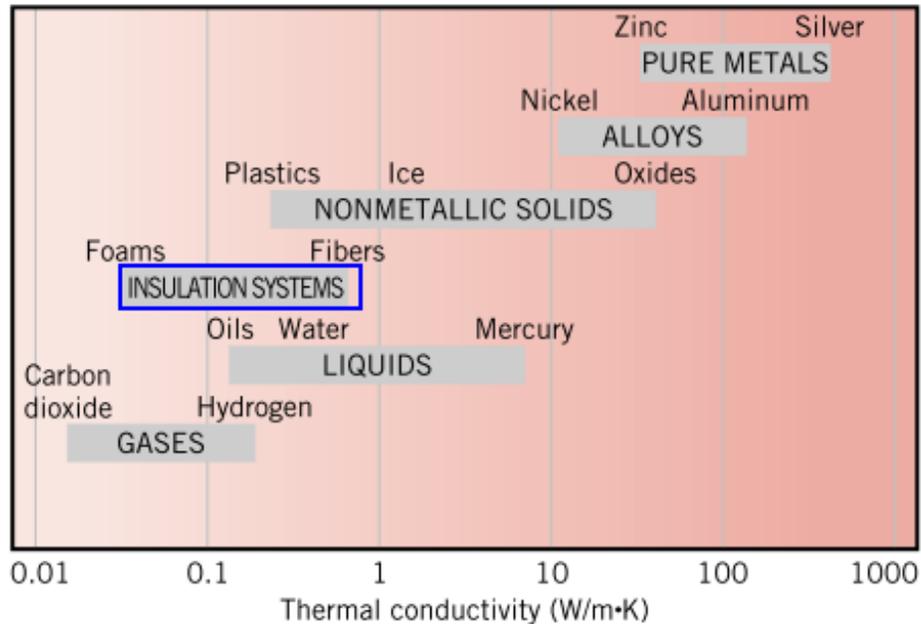


Figura 3-22 Conductividad térmica para diferentes estados de la materia y sistemas aislantes (Fuente: Incropera et al., 2007)

Existen varios parámetros que se tienen en cuenta en el momento de seleccionar un material como aislante térmico de acuerdo a una determinada función, por ejemplo, la densidad, la resistencia térmica, transferencia de calor, la difusividad térmica, el costo, la resistencia a la absorción de humedad, pero el parámetro más importante es la conductividad térmica, por tener la capacidad de resistir el calor.

3.5.3 Pruebas complementarias

Coefficiente de absorción acústica

En esta sección se incluye el desempeño acústico del material a base de micelio desarrollado a partir de la metodología descrita anteriormente sin utilizar ningún tipo de

recubrimiento. Se utiliza el método establecido en la norma ISO10354 para determinar el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia normal en un tubo de impedancia, es decir, el ruido incide en forma de onda perpendicular a la superficie de la muestra, donde se obtiene valores exactos para las condiciones de frecuencia y espesor de la muestra.

El método del tubo de impedancia necesita muestras con un diámetro equivalente al diámetro del tubo, en este caso corresponde a 8 cm.

El coeficiente de absorción acústica es el cociente de la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo y la energía acústica incidente, para una onda plana de incidencia normal (Acústica. Determinación Del Coeficiente de Absorción Acústica y de La Impedancia Acústica En Tubos de Impedancia. Parte 1: Método Del Rango de Onda Estacionaria, ISO 10534-1:1996)

El ensayo consiste en colocar la muestra en uno de los extremos del tubo de impedancia, donde la onda acústica senoidal incidente se produce por un altavoz situado al otro extremo del tubo, generándose un sistema de ondas al interior del tubo. La evaluación se basa en las magnitudes medidas de los niveles de presión acústica, para los mínimos y máximos de presión, también debe medirse la distancia mínima del primer mínimo de presión acústica, con estos datos se determina el coeficiente de absorción acústica en una frecuencia determinada. La Figura 3-23 ilustra de manera teórica las presiones de la onda y la distancia a estas presiones.

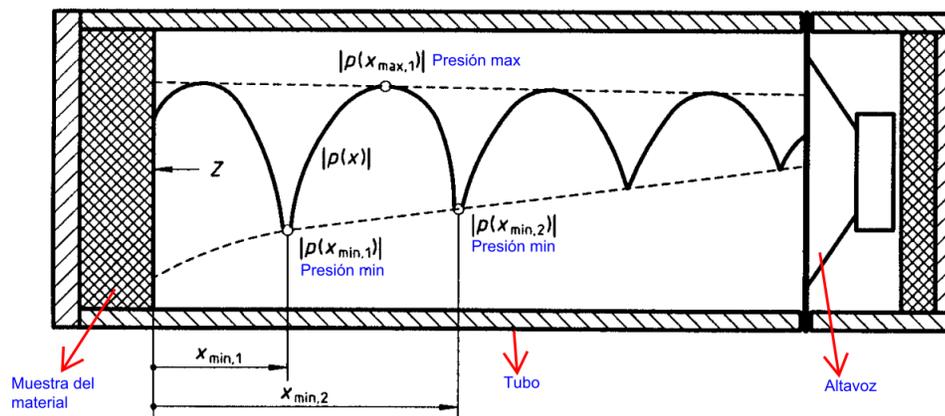


Figura 3-23 Representación de la onda acústica dentro el tubo de impedancia (Fuente: Acústica. Determinación Del Coeficiente de Absorción Acústica y de La

Impedancia Acústica En Tubos de Impedancia. Parte 1: Método Del Rango de Onda Estacionaria, ISO 10534-1:1996)

La Figura 3-24 muestra el montaje del ensayo acústico en el tubo de impedancia, se observa la muestra del biomaterial colocado en un extremo del tubo y el altavoz en el otro extremo.



Figura 3-24 Ensayo acústico A. Muestras de biomaterial B. Muestra en extremo del tubo. C. Tubo de impedancia

Intervalo de frecuencias de trabajo ($f_i < f < f_u$)

El intervalo de frecuencias del tubo de impedancia está determinado por la longitud y el diámetro de su sección, que para este caso aplica como sigue.

Frecuencia mínima f_i

$$L = \frac{250}{f_i} + 3d \quad \text{Ec.(10)}$$

$$f_i \geq 160.42\text{Hz}$$

Donde

L : Longitud del tubo 1.50 m

d : Diámetro del tubo

Frecuencia máxima f_u

$$f_u d \leq 200 \quad \text{Ec.(11)}$$

$$f_u \leq 2515.73\text{Hz}$$

El rango de frecuencias para el tubo de impedancia en el que se realizan las medidas de presión de la onda acústica corresponde a $160 < f < 2500$, este rango es dividido según la normativa en bandas de octavas, es decir, se divide en frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz, frecuencias en las que se determina el la absorción del material.

El coeficiente de absorción acústica α , está dado por la ecuación:

$$\alpha = 1 - |r| \quad \text{Ec.(12)}$$

Donde

r : Coeficiente de reflexión

La formulación para el cálculo del coeficiente de reflexión es el siguiente:

$$\Delta_n = \frac{P_{min2} - P_{min1}}{P_{max}} \quad \text{Ec.(13)}$$

$$\frac{K_o'' \lambda_o}{4} = \ln \left(\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right) \quad \text{Ec.(14)}$$

$$K_o'' X_{min} = 4 \left(\frac{K_o'' \lambda_o}{4} \right) \left(\frac{X_{min1}}{\lambda_o} \right) \quad \text{Ec.(15)}$$

$$S_1 = \frac{P(X_{max1})}{P(X_{min1})} \quad \text{Ec.(16)}$$

$$|r| = e^{2K_o'' X_{min}} \left(\frac{S_1 - e^{K_o'' \lambda_o/4}}{S_1 + e^{-K_o'' \lambda_o/4}} \right) \quad \text{Ec.(17)}$$

Donde

λ_o : Longitud de onda a una frecuencia dada

P_i : Niveles de presión (amplitudes)

X_i : Distancias a los puntos de presión

S_1 : Rango de onda estacionaria del primer mínimo

$\frac{K_o'' \lambda_o}{4}$: Atenuación del tubo

K_o : Número de onda de campo libre

Δ_n : Constante numérica

La Tabla 3-24, muestra los resultados del cálculo del coeficiente de absorción para cada banda de frecuencia, con base en la formulación anterior mostrada. Los valores de P_{min2} , P_{min1} , P_{max} , X_{min1} , son valores medidos en el momento de la prueba que corresponden a las amplitudes de onda en los dos primeros mínimos que registra el sonómetro y la amplitud máxima que es la amplitud entre las dos amplitudes mínimas.

Tabla 3-24 Cálculo del coeficiente de absorción (Fuente: Elaboración propia)

Muestra - Material de micelio e = 2.54 cm											
Frecuencia	λ_o	P_{min2} (db).	P_{min1} (db)	P_{max} (db)	X_{min1} (m)	Δ_n	$k_o'' \lambda_o/4$	$k_o'' X_{min1}$	S1	$ r $	α
250	1.41	91.45	90.00	111.50	0.33	0.013	0.006	0.0021	1.238	0.104	0.89
500	0.69	89.60	88.90	110.20	0.16	0.006	0.003	0.0005	1.239	0.105	0.89

1000	0.35	85.00	84.70	103.10	0.08	0.002	0.001	0.0001	1.217	0.097	0.90
2000	0.18	96.40	96.00	110.90	0.04	0.003	0.001	0.0001	1.155	0.071	0.92
										Promedio	0.91

El coeficiente de absorción de la muestra del biomaterial a base de micelio con diámetro de 8 cm y 2.5 cm de espesor, presenta un coeficiente de absorción alto, superior a 89% para las frecuencias indicadas que corresponden a frecuencias audibles por los humanos y representan parte de ruidos graves y parte de ruidos medios. Para mejor entendimiento del sonido en las frecuencias que el material puede absorber se muestra la Figura 3-25, donde el material puede absorber ruido de una sala, una casa u oficina.

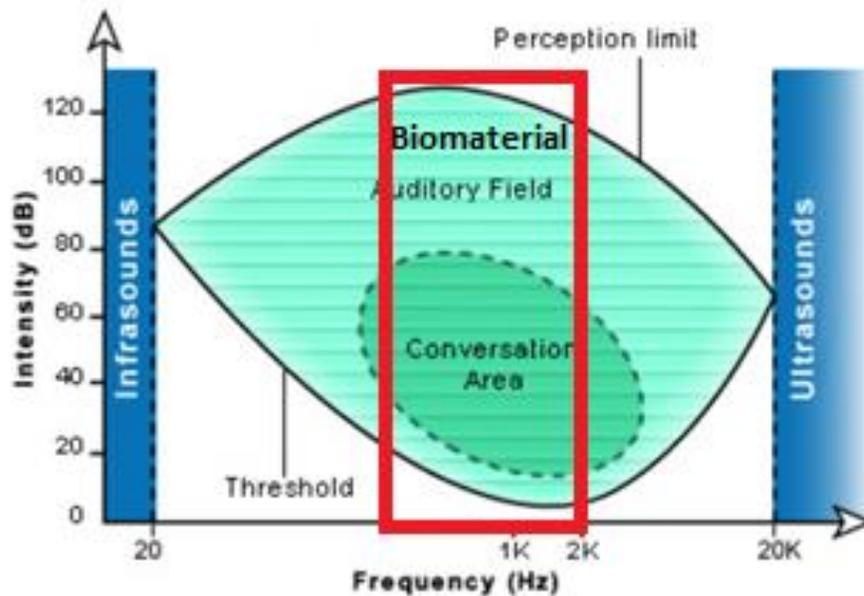


Figura 3-25 Curva de audición humana (Fuente:Cochlea, n.d.)

Este resultado demuestra un potencial significativo del biomaterial, ya que tiene resultados mejores que materiales comunes en el campo de la construcción y en acondicionamientos acústicos como la lana de vidrio mostrado en la Tabla 3-25.

Tabla 3-25 Absorción acústica de diferentes materiales (Fuente: Flores et al., 2013)

	Coeficiente de absorción sonora
--	---------------------------------

Material	Descripción	Espesor (mm)	Frecuencia central por banda de octava (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Fibra	Placas de fibra	16	0.3	0.32	0.54	0.74	0.67	0.6
Lana de vidrio	Placas de vidrio con lámina vinilo sin perforar	16	0.57	0.39	0.41	0.82	0.89	0.72
Hormigón	Bloque de hormigón grueso		0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Ladrillo	Ladrillo liso		0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Lana de vidrio	Placas de vidrio con film de PVC	20	0.68	0.64	0.61	0.81	0.66	0.39
Corcho	Revestimiento de corcho	20	0.68	0.64	0.61	0.81	0.66	0.39
Goma	Alfombra de goma	5	0.03	0.04	0.06	0.08	0.07	0.05
Revoque	Revoque de cal y arena	20	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Madera	Madera sobre hormigón		0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Madera	Fibra de madera	50	0.04	0.24	0.54	0.88	0.53	0.7

Absorción de agua

Se realiza prueba complementaria para conocer el porcentaje de absorción de agua del material. Las muestras fueron desarrolladas de acuerdo a la metodología descrita anteriormente, sin utilizar ningún tipo de recubrimiento. A partir de la metodología establecida en la norma NTC4017. La metodología consiste en sumergir parcialmente el material en agua (50% de su altura) por un periodo de tiempo. El material seco es pesado antes del inicio de la prueba, posteriormente se sumergen las muestras en agua y por varios periodos de tiempo se pesa cada muestra. Con estos valores del peso inicial y final se determina el porcentaje de absorción. En la Tabla 3-26, se indican las dimensiones y el peso seco de las muestras.

Tabla 3-26 Dimensiones y densidad de las muestras (Fuente: Elaboración propia)

Muestra	Altura (cm)	diámetro (cm)	Peso seco (g)	Densidad (kg/m ³)
1	4.0	5.0	17	216.45
2	4.5	5.3	21	211.53
3	4.0	5.0	20	254.65
promedio	4.2	5.1	19	227.50

En la Tabla 3-27, se indica el peso de las muestras después de sumergirlas parcialmente a un 50% de la altura. La medición se realizó en el tiempo que se indica en la tabla. Puede verse que el peso de las muestras aumenta significativamente en poco tiempo, en dos horas aumenta en promedio el 50% de su peso.

Tabla 3-27 Peso de las muestras sumergidas en el tiempo (Fuente: Elaboración propia)

Tiempo	Peso (g)		
	M1	M2	M3
1 min	17	21	20
10 min	18	24	21
20 min	20	27	22
30 min	21	28	24
40 min	22	30	25
50 min	22	31	26
60 min	23	33	27
120 min	25	35	31
180 min	30	38	38
10 horas	35	42	43
24 horas	38	47	47
48 horas	38	47	47

La Tabla 3-28 indica el porcentaje de absorción del material. El resultado para un material a base de micelio sin ningún tipo de recubrimiento o impermeabilización es desfavorable ya que puede absorber agua en un porcentaje superior al 100%.

Tabla 3-28 % de absorción de las muestras (Fuente: Elaboración propia)

Tiempo	% Absorción		
	M1	M2	M3
1 min	0	0	0
10 min	6	14	5
20 min	18	29	10
30 min	24	33	20
40 min	29	43	25
50 min	29	48	30
60 min	35	57	35
120 min	47	67	55
180 min	76	81	90
10 horas	106	100	115
24 horas	124	124	135
48 horas	124	124	135

Se concluye que el material tiene un uso limitado para funciones en contacto con agua, ya que la absorbe con rapidez y en consecuencia afectar su comportamiento.

3.5.4 Aplicaciones del biomaterial en el campo de la construcción

Un material con las características obtenidas, liviano y con potencial termo-caústico, puede tener diversas aplicaciones dentro de la industria de la construcción, por ejemplo, como material aligerante, material de relleno en un muro seco, material de relleno en placas contrachapadas, aportando reducción en la extracción de materia prima y al mismo tiempo funcionar como panel termo-acústico en una edificación.

El poliestireno expandido, es un plástico celular ligero, conformado por partículas esféricas compuestas por un 98% de aire. Presenta buenas características físico-mecánicas que lo convierte en un material de interés en aplicaciones relacionadas con la construcción, es liviano y tiene buena capacidad para aislar el calor, el ruido, no necesita mantenimiento constante, absorben impactos y no absorben agua, es de bajo costo, entre otras. Sin embargo, es un material muy nocivo para el ambiente, ya que es derivado del petróleo, y su producción genera altas emisiones de CO₂. Es un material no renovable, y su degradación tarda miles de años (Ramli Sulong et al., 2019). De acuerdo con el uso del poliestireno expandido en el campo de la construcción, el biomaterial a base de micelio puede proyectarse en estas aplicaciones ya que tienen algunas características en común, como material de bajo peso y función como aislante térmico. Estas aplicaciones son las siguientes:

Aligerante: La función principal de los materiales aligerantes es proporcionar una relación resistencia-peso óptima, proporcionando estructuras más ligeras, pero igualmente robustas. Al reducir el peso de un material compuesto con aligerantes, disminuye el peso propio, facilitando el transporte, el montaje, la manipulación, generando menor consumo energético y menor impacto ambiental por la reducción de materia prima para su construcción, por lo tanto, proporciona una alternativa para alivianar el de losas y muros convencionales de solo concreto (Ramli Sulong et al., 2019).

Paneles aislantes: Se puede construir paneles en forma de sándwich, utilizados en elementos de concreto, o tableros de fibras orientadas, donde su núcleo esté conformado por un biomaterial de micelio, como sustituto del poliestireno expandido. Paneles utilizados

en muros, techos y pisos, puede funcionar como aislante térmico y acústico. (Ramli Sulong et al., 2019). Este tipo de aplicación, es funcional ya que el biomaterial se encuentra en la mitad de dos capas que le generan protección contra la intemperie y contra agentes biológicos que afectan su comportamiento mecánico. Esta alternativa ayuda a mejorar la eficiencia energética de los edificios, reduciendo los costos en la refrigeración. Figura 3-26 se muestra un ejemplo de proyecciones de los sistemas de sándwich, donde puede proyectarse el material a base de micelio.

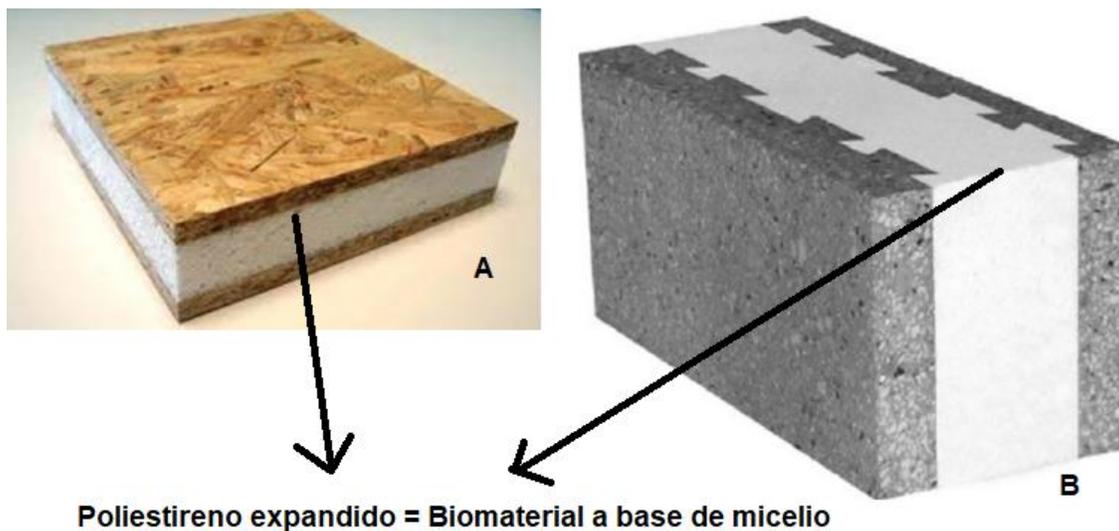


Figura 3-26 Proyección de material a base de micelio A: Sándwich de fibras orientadas. B: Sándwich con placas de hormigón (Fuente: Adaptado de Ramli Sulong et al., 2019)

Muro seco: Es una estructura de pared conformada por un armazón de madera o de acero, en cuyo núcleo se dispone de un material aislante, como la fibra de vidrio, recubierto por capas de diversos materiales como yeso, madera, entre otros (De Máquinas y herramientas, 2018). Este sistema ofrece ventajas como aislante térmico, acústico y facilitando la rapidez en la construcción. El biomaterial a base de micelio puede proyectarse para este tipo de sistemas, debido a que es liviano y con capacidad de aislar el calor.

En la Figura 3-27 se muestra una alternativa para el uso del biomaterial a base de micelio dentro de un sistema de muro seco.

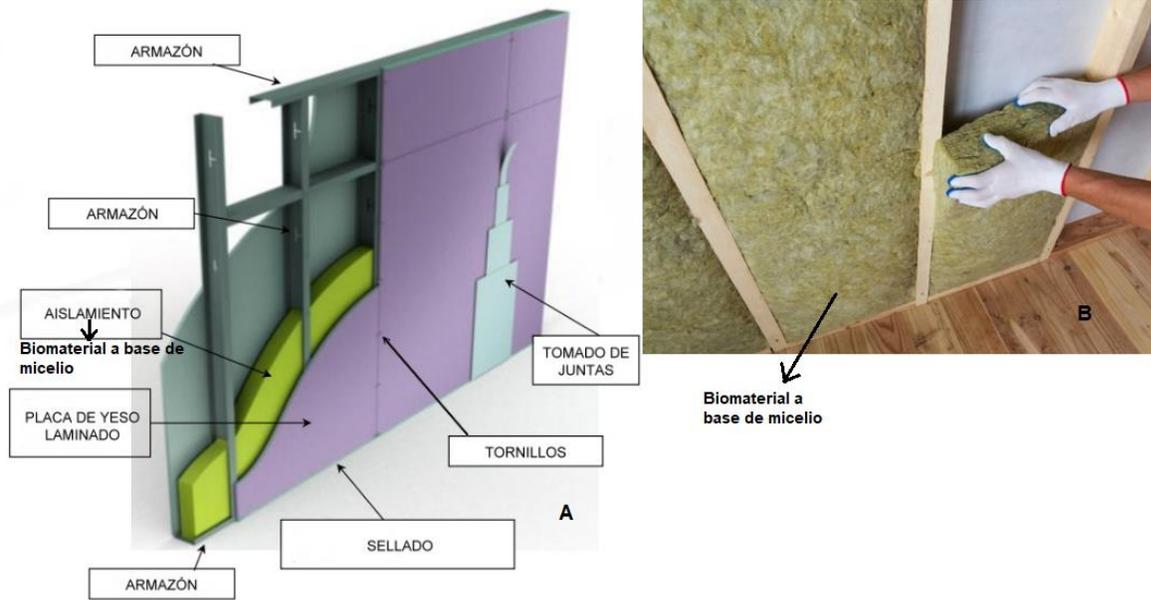


Figura 3-27 Sistema de muro seco-proyección del biomaterial A: Montaje muro seco. B: Material aislante al interior del muro seco (Fuente: adaptado de Máquinas y herramientas, 2018)

Limitaciones: Por el resultado en la prueba a compresión, el biomaterial a base de micelio tiene baja capacidad mecánica, con una resistencia de 0.1 MPa comparado con materiales convencionales utilizados en la construcción, como el concreto 21 MPa, madera 15-20 MPa o acero 550 MPa, por lo que limita su uso a nivel estructural. Es susceptible a la humedad, por ser un material aglomerado y sin ningún tipo de mejoramiento, hace que pierda resistencia cuando entra en contacto con el agua, debido a que las partículas de madera que conforman el aglomerado absorben humedad. Por lo tanto, al ser un material vulnerable a la intemperie, se convierte en un material con vida útil corta (Javadian et al., 2020).

3.5.5 Macro y microscopía del desarrollo del micelio

A continuación, se muestra fotografías del crecimiento micelial del biomaterial a una escala macro, Figura 3-28, donde se observa partes de la muestra con diferentes niveles de colonización. Las zonas blancas muestran mayor concentración de la red de hifas, mientras que en las zonas donde se ve el sustrato hay poca concentración, pero sí hay hifas que están degradando el medio, lo anterior se evidencia en la Figura 3-29. Allí, se observa con más claridad las hifas como infinidad de vellos alrededor de todo el sustrato

en diferentes concentraciones. Es un crecimiento heterogéneo condicionado a factores como: parámetros ambientales, cantidad de granos “spawn”, la formaleta de la muestra, entre otros, que pueden ser optimizados para aumentar la concentración del micelio de forma homogénea en todo el sustrato.



Figura 3-28 Desarrollo del micelio a escala macro

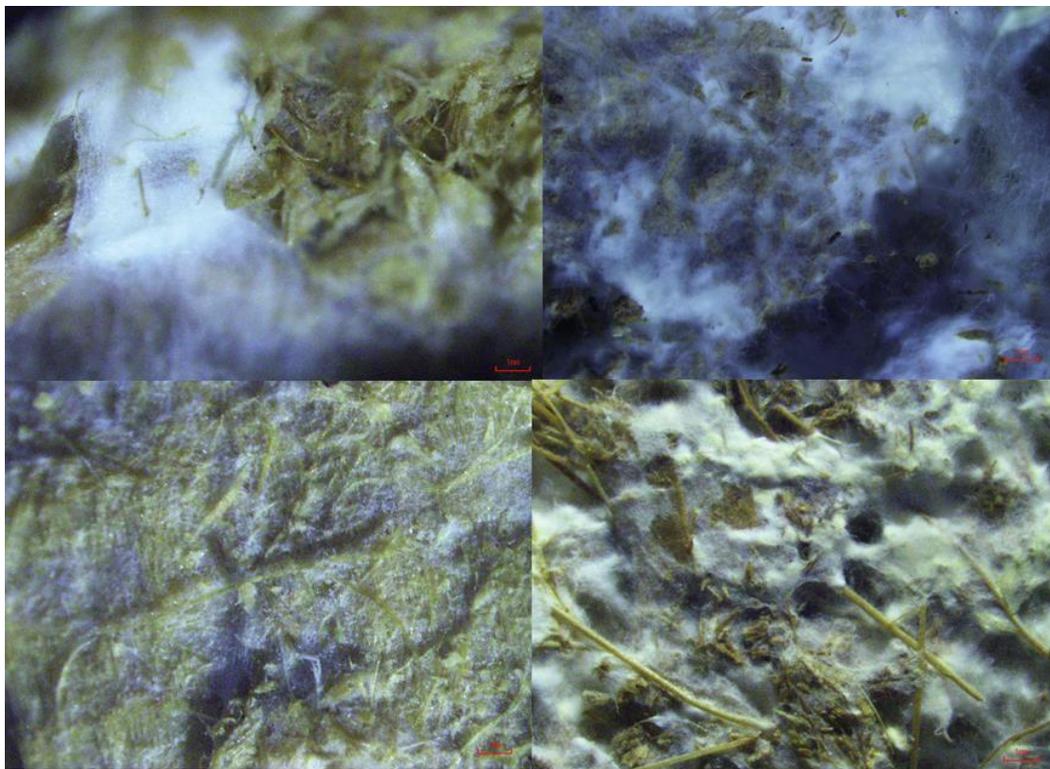


Figura 3-29 Desarrollo del micelio a escala micro

3.6 Comparación de materiales

3.6.1 Desarrollos con el hongo *Pleurotus ostreatus*

En la Tabla 3-29 se muestra una comparación del desarrollo y resultado del biomaterial a base de micelio estudiado en esta investigación respecto a los desarrollos de las patentes encontradas, evidenciando diferencias entre los métodos y resultados, considerando viable el cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*.

Las patentes inventan elementos a base del micelio del hongo *Pleurotus ostreatus* a partir de metodologías puntuales y no experimentales, donde diseñan el sustrato con un alto valor nutritivo para garantizar el crecimiento óptimo del micelio, con una característica en particular y es que forman una especie de lodo que luego es inoculado. Las condiciones del cultivo son más extremas en cuanto a la humedad. La función del material también es específica, dado que la patente 1 desarrolla componentes para vehículos y la patente 2, forma materiales con diversas funciones como aislante, absorbente, entre otras. El material de la investigación a diferencia de las patentes, es desarrollado bajo una metodología

experimental típica para el cultivo del micelio, utilizando un sustrato compuesto principalmente por residuos madereros y las condiciones ambientales, representan las condiciones locales, que igualmente son aptas para el crecimiento del hongo. Se obtiene un material liviano con proyecciones de uso en el campo de la construcción debido a que puede absorber calor, puede ser útil para acondicionamiento acústico, como aligerante en estructuras, convirtiéndose como tema de estudio para mejorar sus propiedades y usos. Si bien la concepción de un material a base de micelio es la misma para todos los materiales que se puedan desarrollar, ya que comprende la generación de un medio para que un organismo vivo se desarrolle, el crecimiento es bastante susceptible a cualquier estímulo en cualquiera de las fases de su proceso y en consecuencia múltiples resultados.

Tabla 3-29 Comparación de materiales desarrollados con *Pleurotus ostreatus*

Investigación actual	Patente 1	Patente 2
Título: Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción	Título: Method of making foamed mycelium structure	Título: Method for producing grown materials and products made thereby
<p>Descripción: Desarrollo de un material a base de residuos madereros aglomerados por micelio, para ser caracterizado mecánica, térmica y acústicamente y determinar en qué funciones dentro del campo de la construcción puede ser viable su uso.</p> <p>Metodología: Cultivo del material en estado sólido, adaptando el método típico de crecimiento, donde se tiene la sepa en granos para ser inoculados en el sustrato esterilizado, seguido por el proceso de colonización en</p>	<p>Descripción: Creación de un método para la fabricación de piezas moldeadas, como componentes específicos en vehículos, utilizados en puertas, reposabrazos, parachoques, revestimientos de techo, pisos, asientos y aisladores de sonido.</p> <p>Metodología: Cultivo del material en estado líquido, donde se forma una solución del inóculo en un medio nutritivo rico en lignina (fibras de coco, arroz, maíz, y fibras de algodón). El sustrato es finamente molido y se le adiciona una solución acuosa</p>	<p>Descripción: El invento describe un método para crecer materiales ecológicos como aislantes, empaques, enfriadores y macetas para plantas.</p> <p>Metodología: Crecimiento del micelio para crear materiales compuestos por un tejido celular del hongo <i>Pleurotus ostreatus</i>, en un sustrato constituido por perlita hortícola (mineral usado para resistir el fuego), cascarilla de arroz, granos de destilería (tipo de cereal), celulosa (papel reciclado), fibra de coco y aserrín. Todos estos</p>

Investigación actual	Patente 1	Patente 2
<p>un tiempo determinado, formado del material en las muestras requeridas, por último, secadas y pots-procesadas con la aplicación de recubrimientos.</p> <p>Condiciones de cultivo: Humedad 65%, temperatura 25°C y tiempo de cultivo 45 días.</p> <p>Resultado: Material liviano de baja resistencia (0.07-0.1 MPa), con capacidad para absorber calor (conductividad térmica $k=0.082$) y para absorber sonido (absorción promedio de 90% para frecuencias ente 250 y 2000 Hz)</p>	<p>ya sea agua o aceite para formar una especie de lodo. Esta mezcla es colocada en recipientes que son agitados e inyectados con gases (oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno), para generar burbujas y promover a que el micelio se forme alrededor de estas una vez se disponga en moldes con la forma de los componentes para vehículos. (Descritos anteriormente).</p> <p>Condiciones de cultivo: Humedad entre 20-100%, temperatura superior a 21°C y tiempo de cultivo 2 semanas.</p> <p>Resultado: Componentes de bajo peso, biodegradables, de bajo costo, como alternativa de partes convencionales no biodegradables de un vehículo.</p>	<p>materiales fueron mezclados para formar un tipo de lodo para ser inoculado. La mezcla se dispone en una serie de recipientes cerrados, pero con entradas de aire con formas específicas y de acuerdo a las condiciones de cultivo se da lugar al crecimiento del micelio dentro y alrededor del sustrato.</p> <p>Condiciones de cultivo: Humedad al 100%, temperatura 24°C y tiempo de cultivo 14 días.</p> <p>Resultado: Producción de materiales caracterizados como elementos acústicos, aislantes, amortiguadores, protectores resistentes al fuego, biodegradables, que variando la composición de los nutrientes se puede obtener tales propiedades</p>
	<p>Referencia:(Kalisz & Rocco, 2012)</p>	<p>Referencia:(Bayer & McIntyre, 2017)</p>

3.6.2 Propiedades de materiales vs material a base de micelio

En la Tabla 3-30, se indica una comparación de las propiedades obtenidas del material de esta investigación, correspondientes a densidad, resistencia a la compresión, capacidad térmica, coeficiente de absorción acústica y absorción de humedad respecto a otros materiales como polímeros sintéticos **PS:** Poliestireno, **PU:** Poliuretano y **PF:** Fomi, fibra de vidrio y productos de madera **PW:** Contrachapado, **SW:** Madera blanda y **HW:** Madera dura.

Tabla 3-30 Propiedades material a base de micelio con otros materiales
(Fuente: Elaboración propia)

Propiedad	Biomaterial de estudio	Polímeros sintéticos	Fibra de vidrio	Productos de madera
Densidad (kg/m ³)	270-380	PS: 11-50 PU:30-100 PF: 35-120	2600	PW: 460-680 SW: 440-600 HW: 850-1030
Resistencia a la compresión (Mpa)	0.07-0.10	PS: 0.03-0.69 PU: 0.002-48 PF: 0.2-0.55	0	PW: 8-25 SW: 35-43 HW: 68-83
Conductividad térmica K (W/mK)	0.082	PS: 0.03-0.04 PU: 0.006-0.8 PF: 0.03-0.04	1	PW: 0.3-0.5 SW: 0.08-0.3 HW: 0.2-0.5
Coefficiente de absorción acústica (NRC)	0.90 (250-2000 Hz)	PS:0.2-0.6 PU:0.2-0.8 PF:- (1000 Hz)	0.85 (250-2000 Hz)	PW: 0.1-0.23 SW: 0.05-0.15 HW: 0.05-0.15 (1000 Hz)
Absorción de agua (wt%)	127% para 48 horas	PS: 0.03-9 PU:0.01-72 PF: 1-15	20-60	PW: 5-49 SW: 5-190 HW: 5-190
Tiempo de manufactura	45 días	Minutos -días	Minutos -días	Minutos -días
Final de vida	Compostaje	Reciclaje, incineración, relleno sanitario.	Reciclaje, incineración, relleno sanitario.	Reciclaje, incineración, relleno sanitario.
Referencia	Elaboración propia	(Jones et al., 2020a)	(Calvosealing, n.d.)	(Jones et al., 2020a)

NRC: Coeficiente de reducción de ruido, 0 indica reflexión total y 1 indica absorción total

De acuerdo a la tabla anterior, el material a base de micelio se destaca por tener buenas propiedades termo-acústicas, cuyos valores de conductividad térmica (K=0.082 W/mK) y coeficiente de absorción acústica (NRC = 0.9) pueden competir con valores de polímeros

sintéticos como el poliuretano ($k= 0.006-0.8 \text{ W/mK}$ y $\text{NRC} = 0.2-0.8$). La resistencia del material es semejante a la resistencia a compresión de los materiales sintéticos, que tienen valores bajos 0.02, 0.04, 0.8 MPa y no validan funciones estructurales. Es evidente su alto nivel de absorción de agua, representando una desventaja respecto a los otros materiales, comprometiendo su durabilidad y funcionamiento. Otra desventaja es el tiempo de producción ya que el crecimiento del hongo es lento, contrario a la manufactura de los otros materiales que requiere solo días. Sin embargo, esta dificultad se compensa con un beneficio ambiental ya que el biomaterial puede compostarse y los otros comúnmente son desechados en rellenos.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- La plasticidad del material es consecuencia de su composición y desarrollo (cultivo), es decir, el material es un compuesto de diferentes desechos madereros aglomerados con micelio que, en un tiempo de crecimiento de 45 días, bajo las condiciones presentadas, la red de hifas que enlazan al sustrato es espumosa y no rígida en comparación a una resina sintética o al concreto, por lo tanto, se tienen resistencias con valores entre 70 kPa y 100 kPa, resistencias bajas que determinan un uso no estructural en el campo de la construcción.
- El desarrollo del cultivo, se obtienen muestras con pesos que oscilan entre 57 - 71g para los cilindros recubiertos con el tanino y 84 - 117g para los cilindros recubiertos con el mortero de cal, cuya densidad promedio es de 257 y 370 kg/cm³, respectivamente. Lo anterior corresponde a valores de densidades y pesos bajos, pero que soportan cargas axiales hasta 30 kg en promedio para deformaciones inferiores al 20% de su altura. Este resultado es significativo para un material liviano, representando propiedades equivalentes a materiales que se emplean en falso techo o en un muro seco.
- El efecto del recubrimiento está asociado a la funcionalidad de la naturaleza de cada mezcla utilizada; el quebracho es un tanino natural, y su aplicación se realizó en la superficie de la muestra, al igual que el mortero de cal, y en ambos casos no se generó absorción al interior de las muestras, por lo tanto, no tuvo un efecto en el aumento de la resistencia; su aplicación no tiene más alcance que la de recubrir o de considerarse como un sistema de protección.

- Del análisis estadístico, es significativo el sustrato utilizado en la conformación de las muestras del biomaterial ante la presencia y ausencia de chips, ya que las diferencias en las resistencias y en general su composición, influencia en gran medida el comportamiento del material debido a su origen, densidad, proporción. La resistencia se analiza de acuerdo a varios porcentajes de deformación que, asociada al sustrato, el material sin chips presenta mayores resistencias que el material cultivado con chips.
- El material tiene un comportamiento plástico donde el sustrato tiene influencia sobre la resistencia y sobre la deformación. Se realiza un ajuste del modelo estadístico para obtener un modelo predictivo donde se muestra la relación entre la deformación aplicada y el esfuerzo que el material ejerce en respuesta a la deformación, con el fin de obtener proyecciones del material y proporcionar herramienta para elegir materiales que tengan comportamientos parecidos, como el corcho, o el poliestireno expandido.
- El valor de la conductividad térmica del biomaterial a base de micelio es de 0,08283 W/mk \pm 0,01061, con un porcentaje de error del 12,8%, valor que representa buena capacidad para resistir la transferencia de calor en condiciones de temperatura promedio de 35°C, por lo tanto, el material tiene potencial para usarse como muro seco, que no esté sometido a cargas físicas ni esté expuesto a la intemperie debido a que tiene niveles altos de absorción de agua. De acuerdo a esta capacidad, el material tiene potencial para ser sustituto de lanas minerales, poliestireno expandido y poliuretano, materiales típicos no renovables utilizados como aislante térmicos.
- El material con espesor de 1 pulgada, tiene un coeficiente de absorción acústica en promedio de 0.90 para un rango de frecuencias entre 250 y 2000 Hz, donde el coeficiente de 1 representa absorción del 100%. El resultado es prometedor ya que compite con materiales convencionales como la fibra de vidrio, utilizada en acondicionamientos acústicos de salas, oficinas y casas. Dado que el material también absorbe calor, tiene potencial para un funcionamiento termo-acústico dentro del campo de la construcción.

4.1.2 Recomendaciones

- Es complejo el proceso del cultivo cuando se trabaja con grandes cantidades, por lo tanto, es necesario planear la inoculación en varios días para que se garanticen las condiciones de asepsia y se disminuya el riesgo de infección. Adicional en el proceso del cultivo se recomiendan las siguientes actividades:
 - o Aumentar entre 20% - 30% del peso del sustrato, la cantidad de granos de micelio "Spawn", para obtener un material más homogéneo, con más concentración de hifas que en consecuencia aumenta el micelio como aglutinante y aumenta la rigidez del material.
 - o Aumentar la humedad relativa en las condiciones de crecimiento a un 100% para acelerar el crecimiento y disminuir el tiempo de producción.
 - o Realizar una caracterización química del sustrato para saber con certeza la cantidad de nutrientes que aporta y generar un crecimiento más eficiente

- Proyectando el material de la investigación a paneles termo-acústicos, puede incluirse un reforzamiento interno de acuerdo al tamaño del panel, para aumentar su rigidez y evitar flexiones que fracturen el material. Este reforzamiento puede ser en forma de retícula usando fibras sintéticas, tela, plástico reciclado, que sea embebida dentro de la formaleta del panel durante el proceso de formado para que el micelio crezca alrededor de este.

- De acuerdo a lo observado, la formaleta tiene un papel importante en el desarrollo del cultivo, ya que el ambiente al interior de ella puede generar más o menos humedad, que a su vez generan diferentes concentraciones de CO₂ y en consecuencia afectan el crecimiento del micelio, ya que las hifas evaden el CO₂ en busca de oxígeno, creciendo fuera del sustrato y adhiriéndose a la formaleta. Se recomienda realizar un diseño que permita el flujo de ventilación para evitar altas concentraciones de CO₂

- De acuerdo a la función del material, evaluar qué tipo de recubrimiento usar. Por ejemplo, para mejorar la impermeabilidad, se puede usar recubrimientos a base de

almidones que generen barrera entre el material y el agua. El uso de resinas naturales durante el crecimiento también puede retardar la velocidad de absorción.

- Desde un contexto biotecnológico, es pertinente estudiar a profundidad la especie de hongo que se quiere utilizar, ya que la información morfológica y biológica proporciona herramientas para entender la capacidad de degradación que tiene el hongo.

- Como recomendación general, es apropiado desarrollar un material a base de micelio en función de las propiedades deseadas, para implementar una metodología con condiciones específicas. Por ejemplo, para desarrollar un material semejante al fomi o a una espuma, el micelio debe crecer fuera del sustrato y las condiciones ambientales deben ser extremas, con altas concentraciones de CO₂, humedad relativa del 100% y temperatura mayor a 30°C.

Referencias

- Ahmadi, H. (2016). *Cellulose-Mycelia Foam: Novel Bio-Composite Material*. The University of British Columbia.
- Alvarez, J. I. (1995). *Historia de los morteros*.
<https://www.researchgate.net/publication/273110688>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design*, 161, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Appels, F. V. W., Dijksterhuis, J., Lukasiewicz, C. E., Jansen, K. M. B., Wösten, H. A. B., & Krijgsheld, P. (2018). Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23171-2>
- Architizer Journal. (2023). *Fight Back with Fungi: How Mushrooms Can Help Solve the Global Housing Crisis - Architizer Journal*. <https://architizer.com.cdn.ampproject.org/c/s/architizer.com/blog/inspiration/stories/mycelium-fungi-architecture-mycohab/amp/>
- Attias, N., Danai, O., Abitbol, T., Tarazi, E., Ezov, N., Pereman, I., & Grobman, Y. J. (2020). Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>
- Bartnicki, S. (1968). *Cell wall chemistry, morphogenesis and taxonomy of fungi*.
www.annualreviews.org
- Bayer, E., & McIntyre, G. (2017). *Method for producing grown materials and products thereby* (Patent No.: US 2017/0049059 A1).
- Bayer, E., & McIntyre, G. R. (2015). *Method for growing mycological material* (Patent US 20150247115 A1).
- Best Made Company LLC. (2023). *Bolt Threads*. <https://boltthreads.com/>

- BIOHM | *The Future Of Home* | London. (2023). <https://www.biohm.co.uk/>
- Brosse, C. (2021). *La basura no existe: Hacia el suprarreciclaje y la economía circular* (Primera). Edinexo. <https://doi.org/628.4>
- Calvosealing. (n.d.). *Fibra de vidrio. Propiedades*.
- Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B., & Neubauer, P. (2019). Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biology and Biotechnology*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>
- Cochlea. (n.d.). Retrieved November 16, 2023, from <https://www.cochlea.org/es/sonidos/campo-auditivo-humano>
- Da Silva Araujo, E., Lorenço, M. S., Zidanes, U. L., Sousa, T. B., da Silva Mota, G., de Nazaré de Oliveira Reis, V., Gomes da Silva, M., & Mori, F. A. (2021). Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124324>
- D'Alessandro, O., Selmi, G., Byrne, C., Deyá, C., & Romagnoli, R. (2018). Tanino de Quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*) como precursor de un inhibidor de corrosión para acero de bajo contenido de carbono. *Revista de Ciencias Forestales*, 26.
- De Máquinas y herramientas. (2018). *De Máquinas y herramientas*. <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-manuales/construccion-en-seco-introduccion>
- Ecovative. (2023). *Ecovative - Mycelium Technology | Sustainable & Biodegradable Material*. <https://www.ecovative.com/>
- Elsacker, E., Vandelook, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS ONE*, 14(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- Elsacker, E., Vandelook, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of the Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>
- Enarevba, D. R., & Haapala, K. R. (2023). A Comparative Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene and Mycelium Packaging Box Inserts. *Procedia CIRP*, 116, 654–659. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.110>
- Flores, M. D., Ferreyra, S. P., Cravero, G. A., Budde, L., Longoni, H. C., Ramos, O. A., Tommasini, F. C., García Garino, C. G., Mirasso, A. E., Storti, M. A., Tornello, M. E.,

- & Mendoza, A. (2013). *Mecánica Computacional Vol XXXII*.
<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra/http://www.conicet.gob.ar://www.amcaonline.org.ar>
- Garcés, E., Correa, M., Coba, B., Zapata, Á., Anacona, A., & Sabogal, S. (2003). *Morfología y clasificación de los hongos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*, 7.
<https://doi.org/10.1038/srep41292>
- Holcim Foundation: Sustainable Construction. (2015). *Fourth Holcim Awards Regional and global Holcim Awards competitions for sustainable construction projects and visions 2014/2015*.
- Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (Cuarta).
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Levine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer - 6th edition*.
- Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2017). Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Scientific Reports*, 7(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2>
- Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria, ISO 10534-1:1996.
- Javadian, A., Le Ferrand, H., Hebel, D. E., & Saeidi, N. (2020). *Application of Mycelium-Bound Composite Materials in Construction Industry: A Short Review*.
www.symbiosisonlinepublishing.com
- Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., & John, S. (2018). Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire and Materials*, 42(7), 816–825. <https://doi.org/10.1002/fam.2637>
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020a). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. In *Materials and Design* (Vol. 187). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020b). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. In *Materials and Design* (Vol. 187). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>

- Kalisz, R. E., & Rocco, C. A. (2012). *Method of making foamed mycelium structure* (Patent US 8227233 B2).
- Kaplan-Bie, J. H., Bonesteel, I. T., Greetham, L., & McIntyre, G. R. (2019). *Increased homogeneity of mycological biopolymer grown into void space*.
- López, L., Vega, L., Rendón, C., & Tobón, S. (2020). Caracterización de los residuos de la industria de la madera para su aprovechamiento en diferentes aplicaciones. *Ingeniería y Desarrollo, N°38*.
- Magical Mushroom Company. (2023). *Magical Mushroom*. <https://magicalmushroom.com/>
- Manan, S., Ullah, M. W., Ul-Islam, M., Atta, O. M., & Yang, G. (2021). Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts, 6*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001>
- Meet Mylo™. (2023). <https://mylo-unleather.com/>
- Meyer, V., Basenko, E. Y., Benz, J. P., Braus, G. H., Caddick, M. X., Csukai, M., De Vries, R. P., Endy, D., Frisvad, J. C., Gunde-Cimerman, N., Haarmann, T., Hadar, Y., Hansen, K., Johnson, R. I., Keller, N. P., Kraševc, N., Mortensen, U. H., Perez, R., Ram, A. F. J., ... Wösten, H. A. B. (2020). Growing a circular economy with fungal biotechnology: A white paper. In *Fungal Biology and Biotechnology* (Vol. 7, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s40694-020-00095-z>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *Boletín Estadístico Forestal*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2006). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*.
- Mogu. (2022). *Home Mogu - mogu*. <https://mogu.bio/>
- Montalti, M. (2018). *Producing mycelium insulation - Critical concrete*. <https://criticalconcrete.com/producing-mycelium-insulation/>
- Morris, P. W. G. (2017). *Climate Change and what The Project Management Profession should be doing about it - a UK perspective*.
- MycoHAB. (2023). *MycoHAB – Cultivating tomorrow’s possibilities*. <https://www.mycohab.com/>
- Mycotex. (2023). *Mycotex*. <https://www.mycotex.nl/>
- MycoWorks. (2023). *MycoWorks*. <https://www.mycoworks.com/>
- Nai, C., & Meyer, V. (2016). The beauty and the morbid: Fungi as source of inspiration in contemporary art. In *Fungal Biology and Biotechnology* (Vol. 3, Issue 1, pp. 1–5). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s40694-016-0028-4>

Officina Corpuscoli. (2023). *Officina Corpuscoli » About*.

<https://www.corpuscoli.com/about/>

Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Greetham, L., McIntyre, G., Bayer, E., & Kaplan-Bie, J. (2019). Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. *Industrial Crops and Products*, 139.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111533>

Ramli Sulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. In *Journal of Applied Polymer Science* (Vol. 136, Issue 20). John Wiley and Sons Inc.

<https://doi.org/10.1002/app.47529>

Ross, P. (2016). *Method for producing fungus*.

Royse, D. J. (2017). *La Biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas Pleurotus spp*. www.ecosur.mx

Staments, P. (2005). *Mycelium Running*.

Stamets, P. (1993). *Growing gourmet and medicinal mushrooms*.

Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, (2014).

https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-13

Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus 1, (2015).

<https://doi.org/10.1520/C0177-13>

Stelzer, L., Hoberg, F., Bach, V., Schmidt, B., Pfeiffer, S., Meyer, V., & Finkbeiner, M. (2021). Life cycle assessment of fungal-based composite bricks. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111573>

United Nations Environment Programme. (2022a). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window - Climate crisis calls for rapid transformation of societies*.

<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>

United Nations Environment Programme. (2022b). *Global Status Report for buildings and construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. www.globalabc.org.

Vandelook, S., Elsacker, E., Van Wylick, A., De Laet, L., & Peeters, E. (2021). Current state and future prospects of pure mycelium materials. In *Fungal Biology and Biotechnology* (Vol. 8, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00128-1>

- Vanden, E. (2021). *Vrije Universiteit Brussel Mycelium matters-an interdisciplinary exploration of the fabrication and properties of mycelium-based materials*. Vrije Universiteit Brussel.
- Vieira, T. A. S., Arriel, T. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Branco-Vieira, M., Carabineiro, S. A. C., & Trugilho, P. F. (2021). Determination of the chemical composition of Eucalyptus spp. For cellulosic pulp production. *Forests*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/f12121649>
- Williams, E., Cenian, K., Golsteijn, L., Morris, B., & Scullin, M. L. (2022). Life cycle assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather. *Environmental Sciences Europe*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00689-x>
- Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith, G., & Jones, P. (2018). Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>

A. Anexo: Cálculo estadístico- Ensayo a compresión.

Análisis de los efectos

Gráficas análisis cualitativos

```
datos %>%
  group_by(Recubrimiento,Sustrato,Deformacion) %>%
  summarise(m = mean(Esfuerzo)) %>%
  ggplot(aes(x=Deformacion,y=m,colour=Recubrimiento))+
  geom_point()+geom_line()+
  facet_wrap(~Sustrato)+
  xlab("% Deformación") + ylab("Valor medio de Esfuerzo (kPa)")
```

Efecto Curvatura

```
datos <- datos %>%
  mutate(DD = Deformacion^2)
```

ANOVA

```
library(broom)

fit <- aov(Esfuerzo~Recubrimiento*Sustrato*Deformacion*DD,data = datos)
Anova(fit,type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##           Sum Sq Df F value Pr(>F)
## (Intercept)      0.1  1  0.0009 0.9760
## Recubrimiento      0.3  1  0.0017 0.9673
## Sustrato          5.8  1  0.0380 0.8463
## Deformacion     238.1  1  1.5614 0.2172
## DD              13.5  1  0.0887 0.7671
## Recubrimiento:Sustrato      1.4  1  0.0093 0.9235
## Recubrimiento:Deformacion    0.7  1  0.0045 0.9466
## Sustrato:Deformacion     138.9  1  0.9110 0.3443
## Recubrimiento:DD          2.7  1  0.0174 0.8955
## Sustrato:DD             172.2  1  1.1293 0.2929
## Deformacion:DD           1.5  1  0.0101 0.9204
## Recubrimiento:Sustrato:Deformacion  40.0  1  0.2624 0.6107
## Recubrimiento:Sustrato:DD      59.6  1  0.3906 0.5348
## Recubrimiento:Deformacion:DD    7.8  1  0.0514 0.8216
## Sustrato:Deformacion:DD     193.2  1  1.2665 0.2657
## Recubrimiento:Sustrato:Deformacion:DD  75.6  1  0.4956 0.4847
## Residuals          7777.7 51
```

```
# Extracción de Los efectos no significativos (interacciones)
fit <- update(fit, ~. -Recubrimiento:Sustrato:Deformacion:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
## Sum Sq Df F value Pr(>F)
## (Intercept) 10.6 1 0.0702 0.79213
## Recubrimiento 38.6 1 0.2559 0.61512
## Sustrato 11.6 1 0.0771 0.78240
## Deformacion 453.3 1 3.0015 0.08912
## DD 71.9 1 0.4762 0.49322
## Recubrimiento:Sustrato 147.9 1 0.9792 0.32698
## Recubrimiento:Deformacion 51.5 1 0.3409 0.56182
## Sustrato:Deformacion 64.8 1 0.4291 0.51532
## Recubrimiento:DD 43.6 1 0.2886 0.59341
## Sustrato:DD 96.8 1 0.6411 0.42696
## Deformacion:DD 9.1 1 0.0603 0.80696
## Recubrimiento:Sustrato:Deformacion 46.7 1 0.3092 0.58055
## Recubrimiento:Sustrato:DD 50.5 1 0.3341 0.56577
## Recubrimiento:Deformacion:DD 25.5 1 0.1686 0.68306
## Sustrato:Deformacion:DD 119.2 1 0.7890 0.37850
## Residuals 7853.3 52
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Recubrimiento:Sustrato:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
## Sum Sq Df F value Pr(>F)
## (Intercept) 4.1 1 0.0276 0.8686
## Recubrimiento 12.4 1 0.0831 0.7743
## Sustrato 1.6 1 0.0109 0.9172
## Deformacion 425.1 1 2.8509 0.0972
## DD 67.9 1 0.4550 0.5029
## Recubrimiento:Sustrato 118.7 1 0.7958 0.3764
## Recubrimiento:Deformacion 25.8 1 0.1730 0.6791
## Sustrato:Deformacion 94.8 1 0.6360 0.4287
## Recubrimiento:DD 28.8 1 0.1934 0.6619
## Sustrato:DD 106.6 1 0.7151 0.4016
## Deformacion:DD 10.3 1 0.0691 0.7937
## Recubrimiento:Sustrato:Deformacion 0.2 1 0.0016 0.9684
## Recubrimiento:Deformacion:DD 22.0 1 0.1476 0.7023
## Sustrato:Deformacion:DD 111.7 1 0.7491 0.3907
## Residuals 7903.8 53
```

```
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Recubrimiento:Sustrato:Deformacion)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##              Sum Sq Df F value  Pr(>F)
## (Intercept)      4.4  1  0.0300 0.86312
## Recubrimiento    14.8  1  0.1011 0.75168
## Sustrato          2.0  1  0.0134 0.90828
## Deformacion     425.5  1  2.9067 0.09396 .
## DD               67.7  1  0.4627 0.49929
## Recubrimiento:Sustrato 495.0  1  3.3818 0.07142 .
## Recubrimiento:Deformacion 26.6  1  0.1816 0.67166
## Sustrato:Deformacion  94.7  1  0.6469 0.42477
## Recubrimiento:DD     29.1  1  0.1988 0.65751
## Sustrato:DD        107.2  1  0.7323 0.39592
## Deformacion:DD     10.2  1  0.0700 0.79240
## Recubrimiento:Deformacion:DD 22.3  1  0.1520 0.69814
## Sustrato:Deformacion:DD 112.4  1  0.7676 0.38483
## Residuals        7904.0 54
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Recubrimiento:Deformacion:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##              Sum Sq Df F value  Pr(>F)
## (Intercept)      0.1  1  0.0004 0.98437
## Recubrimiento      0.0  1  0.0003 0.98669
## Sustrato           5.1  1  0.0354 0.85144
## Deformacion     431.1  1  2.9913 0.08932 .
## DD               46.2  1  0.3208 0.57345
## Recubrimiento:Sustrato 510.3  1  3.5409 0.06517 .
## Recubrimiento:Deformacion  4.9  1  0.0339 0.85464
## Sustrato:Deformacion  81.4  1  0.5649 0.45549
## Recubrimiento:DD     31.6  1  0.2196 0.64123
## Sustrato:DD        93.4  1  0.6478 0.42437
## Deformacion:DD      1.1  1  0.0073 0.93211
## Sustrato:Deformacion:DD  98.5  1  0.6833 0.41202
## Residuals        7926.3 55
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
fit <- update(fit, ~. -Sustrato:Deformacion:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##              Sum Sq Df F value  Pr(>F)
## (Intercept)      57.9  1  0.4038 0.527740
## Recubrimiento       0.1  1  0.0009 0.976605
## Sustrato          409.6  1  2.8581 0.096476 .
## Deformacion     1397.8  1  9.7541 0.002831 **
## DD               386.1  1  2.6945 0.106302
## Recubrimiento:Sustrato  535.7  1  3.7381 0.058247 .
## Recubrimiento:Deformacion  3.1  1  0.0216 0.883763
## Sustrato:Deformacion    2.4  1  0.0166 0.898042
## Recubrimiento:DD       27.4  1  0.1914 0.663448
## Sustrato:DD            1.9  1  0.0133 0.908533
## Deformacion:DD       136.5  1  0.9528 0.333206
## Residuals          8024.7 56
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Recubrimiento:Deformacion)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##              Sum Sq Df F value  Pr(>F)
## (Intercept)      54.8  1  0.3891 0.535240
## Recubrimiento     13.0  1  0.0921 0.762636
## Sustrato          434.9  1  3.0882 0.084232 .
## Deformacion     1414.3  1 10.0421 0.002461 **
## DD               383.7  1  2.7246 0.104315
## Recubrimiento:Sustrato  533.0  1  3.7843 0.056674 .
## Sustrato:Deformacion    3.8  1  0.0269 0.870400
## Recubrimiento:DD       270.1  1  1.9179 0.171480
## Sustrato:DD            3.2  1  0.0225 0.881334
## Deformacion:DD       138.6  1  0.9844 0.325310
## Residuals          8027.8 57
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Sustrato:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
```

```

##              Sum Sq Df F value  Pr(>F)
## (Intercept)      53.3  1  0.3848 0.53747
## Recubrimiento    13.0  1  0.0939 0.76035
## Sustrato         932.1  1  6.7319 0.01197 *
## Deformacion     1520.4  1 10.9802 0.00159 **
## DD               382.4  1  2.7620 0.10192
## Recubrimiento:Sustrato 536.2  1  3.8727 0.05386 .
## Sustrato:Deformacion  0.9  1  0.0066 0.93572
## Recubrimiento:DD    275.3  1  1.9881 0.16388
## Deformacion:DD     137.5  1  0.9931 0.32312
## Residuals        8031.0 58
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Sustrato:Deformacion)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##              Sum Sq Df F value    Pr(>F)
## (Intercept)      53.1  1  0.3903 0.5345369
## Recubrimiento     12.2  1  0.0899 0.7654142
## Sustrato         2201.3  1 16.1698 0.0001668 ***
## Deformacion     1526.4  1 11.2126 0.0014197 **
## DD               381.6  1  2.8033 0.0993669 .
## Recubrimiento:Sustrato 538.4  1  3.9547 0.0513861 .
## Recubrimiento:DD    282.1  1  2.0721 0.1553041
## Deformacion:DD     136.9  1  1.0060 0.3199654
## Residuals        8031.9 59
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, ~. -Deformacion:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##              Sum Sq Df F value    Pr(>F)
## (Intercept)      18.1  1  0.1331 0.7165441
## Recubrimiento     16.8  1  0.1233 0.7266805
## Sustrato         2201.3  1 16.1682 0.0001644 ***
## Deformacion     9165.5  1 67.3206 2.193e-11 ***
## DD              3817.1  1 28.0365 1.779e-06 ***
## Recubrimiento:Sustrato 510.1  1  3.7469 0.0576211 .
## Recubrimiento:DD    274.8  1  2.0183 0.1605917
## Residuals        8168.8 60
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

```
fit <- update(fit, .~. -Recubrimiento:DD)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##           Sum Sq Df F value    Pr(>F)
## (Intercept)      0.0  1  0.0003  0.985607
## Recubrimiento    49.5  1  0.3577  0.552021
## Sustrato       2201.3  1 15.9028  0.000181 ***
## Deformacion    9210.2  1 66.5378 2.362e-11 ***
## DD             3571.3  1 25.8007 3.833e-06 ***
## Recubrimiento:Sustrato 526.8  1  3.8057  0.055678 .
## Residuals      8443.6 61
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, .~. -Recubrimiento:Sustrato)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##           Sum Sq Df F value    Pr(>F)
## (Intercept)    17.1  1  0.1181 0.7322495
## Recubrimiento  203.7  1  1.4080 0.2399139
## Sustrato       1828.3  1 12.6367 0.0007305 ***
## Deformacion   9402.9  1 64.9893 3.094e-11 ***
## DD             3671.8  1 25.3781 4.344e-06 ***
## Residuals     8970.4 62
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

fit <- update(fit, .~. -Recubrimiento)
Anova(fit, type="III")

## Anova Table (Type III tests)
##
## Response: Esfuerzo
##
##           Sum Sq Df F value    Pr(>F)
## (Intercept)     2.7  1  0.0183  0.892744
## Sustrato       1659.8  1 11.3979  0.001264 **
## Deformacion   9312.5  1 63.9503 3.613e-11 ***
## DD             3619.7  1 24.8566 5.122e-06 ***
## Residuals     9174.1 63
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Análisis de Supuestos

```

qqPlot(fit,pch=19)

shapiro.test(fit$residuals)

##
##  Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  fit$residuals
## W = 0.98779, p-value = 0.7569

bartlett.test(fit$residuals,datos$Sustrato)

##
##  Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data:  fit$residuals and datos$Sustrato
## Bartlett's K-squared = 1.8083, df = 1, p-value = 0.1787

bartlett.test(fit$residuals,factor(datos$Deformacion))

##
##  Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data:  fit$residuals and factor(datos$Deformacion)
## Bartlett's K-squared = 8.7959, df = 4, p-value = 0.06641

plot(predict(fit),fit$residuals,pch=19,las=1,
      main="Homogeneidad de Varianza",
      xlab="Valores Predictivos",ylab="Residuales")
abline(h=0,lty=2,col=2)

```

Modelos lineales

```

mod <- lm(Esfuerzo ~ Deformacion:Sustrato + DD:Sustrato-1,data=datos)
summary(mod)

##
## Call:
## lm(formula = Esfuerzo ~ Deformacion:Sustrato + DD:Sustrato -
##     1, data = datos)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -24.8684  -8.0606   0.5802   8.9393  28.9690
##

```

```
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## Deformacion:SustratoChips      896.93      71.09  12.618 < 2e-16 **
*
## Deformacion:SustratoSin chips 1072.57      66.89  16.034 < 2e-16 **
*
## SustratoChips:DD             -2528.13     419.96  -6.020 9.82e-08 **
*
## SustratoSin chips:DD         -3152.83     391.05  -8.062 2.77e-11 **
*
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 12.31 on 63 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9683, Adjusted R-squared:  0.9663
## F-statistic: 481.3 on 4 and 63 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Validación del modelo

```
qqPlot(mod,pch=19)
```

```
shapiro.test(mod$coefficients)
```

```
##
##  Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  mod$coefficients
## W = 0.81294, p-value = 0.1275
```

```
bartlett.test(mod$residuals,datos$Sustrato)
```

```
##
##  Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data:  mod$residuals and datos$Sustrato
## Bartlett's K-squared = 1.1856, df = 1, p-value = 0.2762
```

```
bartlett.test(mod$residuals,factor(datos$Deformacion))
```

```
##
##  Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data:  mod$residuals and factor(datos$Deformacion)
## Bartlett's K-squared = 8.275, df = 4, p-value = 0.08201
```

```
plot(predict(mod),mod$residuals,pch=19,las=1,
      main="Homogeneidad de Varianza",
```

```

xlab="Valores Predictivos",ylab="Residuales")
abline(h=0,lty=2,col=2)

```

La ecuación del modelo es:

$$y = \beta_1 Dc + \beta_2 Ds + \beta_3 D^2c + \beta_4 D^2s$$

$$y = 896.9332Dc + 1073.8464Ds - 2528.1329D^2c - 3209.4779D^2s$$

Curvas predictivas

Se crea una nueva base de datos de acuerdo con las variables de interés

```

expand.grid(Deformacion=seq(0,0.2,by=0.001),
            Sustrato=c("Sin chips","Chips")) %>%
data.frame() %>% mutate(DD=Deformacion^2) %>%
mutate(p=predict(mod,newdata = .)) %>%
ggplot(aes(x=Deformacion,y=p,colour=Sustrato))+
geom_line(linewidth=1)+
ylab("Predicción del Esfuerzo (kPa)\n")+
xlab("\n% de Deformación")+
#facet_wrap(~Sustrato)+
theme_bw()+
theme(legend.position = "bottom")

```

```

expand.grid(Deformacion=seq(0,0.2,by=0.001),
            Sustrato=c("Sin chips","Chips")) %>%
data.frame() %>% mutate(DD=Deformacion^2) %>%
mutate(p=predict(mod,newdata = .)) %>%
ggplot(aes(x=Deformacion,y=p,colour=Sustrato))+
geom_line(linewidth=1)+ ylab("Predicción del Esfuerzo (kPa)\n")+
xlab("\n% de Deformación")+
facet_wrap(~Sustrato)+
theme_bw()+
theme(legend.position = "bottom")

```

