



Pontificia Universidad Católica de Chile
Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos

COMPONENTE DE MICELIO PARA CUBIERTA

TABLERO INTEGRADO CON MATRIZ DE HONGO
EN CENTRO INTERPRETATIVO DE BOSQUES SUBANTÁRTICOS

SOFÍA ORELLANA VON FREY

Lunes 27 de Septiembre 2021

Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía MASE
Profesores Guía: Francisco Chateau y Sebastián Rodríguez

Tesis de Magíster
"Taller de Biomateriales"

RESUMEN

Los compuestos a base de micelio son el resultado del crecimiento de hongos filamentosos en materiales orgánicos de origen agrícola y forestal. Este tipo de material tiene fortalezas como lo son su alta resistencia térmica, su ligereza y comportamiento mecánico similar a la espuma. Al tratarse de un material biodegradable, el desafío actualmente es el de tratar de resolver ciertas externalidades como lo son sus dificultades frente a agentes orgánicos y ambientales, como también su flexión al momento de recibir grandes cargas. A pesar de ello, sus propiedades pueden mejorarse a través del control de una serie de factores en su proceso de conformación, lo cual representa una oportunidad prometedora para el diseño de productos y materiales, que actualmente han sido desarrollados por diseñadores y arquitectos de forma objetual, tales como luminaria, paneles acústicos, urnas, embalaje, entre otros.

En esta investigación, se propone desarrollar un componente constructivo resistente, capaz de ser puesto a prueba en una envolvente arquitectónica. El componente a desarrollar corresponde a un material con múltiples capas, que incorpora el material de micelio junto a otros elementos que lo complementan, con el objetivo de potenciar sus virtudes y a la vez ofrecer mayores prestaciones para su uso en una cubierta. El componente ha de

ser ubicado en la cubierta de un centro de interpretación en el sur de Chile, aspecto tremendamente demandante respecto a los agentes ambientales. Se espera que, al complejizar el material de micelio con la adición de otros elementos, éste cumpla su función resistente y aislante, y a la vez sea capaz de operar como un componente autónomo, repetible y replicable.

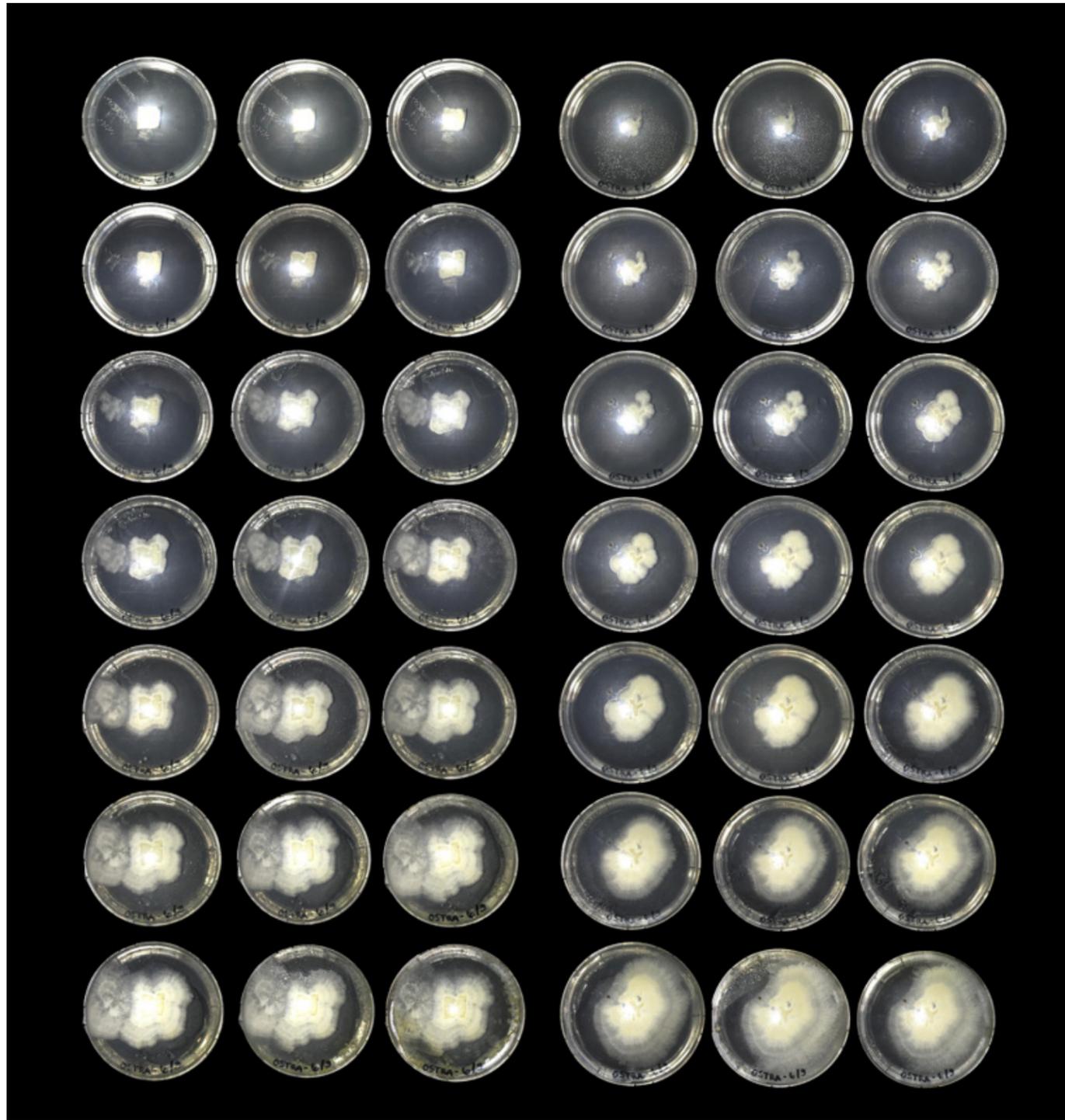
El crecimiento del material como organismo vivo, lo hace una alternativa económica y ambientalmente sostenible, además de su fácil degradación en el entorno natural. La experimentación y manufactura de este biomaterial ofrece oportunidades de nuevas formas y desafíos estructurales, lo cual se presenta como un atractivo para el centro donde se ubica. Se pretende desarrollar de esta forma, un componente constructivo capaz de ofrecer una solución constructiva sustentable por su bajo consumo energético y su característica biodegradable, cuya vida útil nace y fallece en la naturaleza misma. Este método de biofabricación integrada favorece la generación y regeneración de su material constructivo, sentando nuevas bases que contemplan no sólo el origen de los elementos constructivos, sino también su fin.

PALABRAS CLAVE: componente, material compuesto, micelio, biofabricación

ÍNDICE

Las imágenes exhibidas junto a los títulos de cada capítulo corresponden a una recopilación personal realizada a lo largo de la investigación que contempla la experimentación propia con los materiales a base de micelio y aproximaciones proyectuales del componente constructivo y proyecto.

INVESTIGACIÓN	<p>I: FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN INTRODUCCIÓN OBJETO DE ESTUDIO PREGUNTAS HIPÓTESIS OBJETIVOS METODOLOGÍA</p> <p>II: ANTECEDENTES CONTEXTO DEL LABORATORIO DE BIOFABRICACIÓN UC ESTADO DEL ARTE MARCO TEÓRICO</p> <p>III: METODOLOGÍA TABLEROS DE MADERA PROCESO DE PRODUCCIÓN MOLDEADO Y HORNEADO TERMINACIONES</p>
PROYECTO	<p>IV: VARIABLES RELEVANTES USO CONTEXTO DEL LUGAR GEOGRAFÍA CARACTERÍSTICAS</p> <p>V: ARGUMENTO PROYECTUAL OBSERVACIONES ESTRATEGIAS GENERALES REFERENCIA Y EXPLORACIÓN MOVIMIENTOS DE TIERRA RECORRIDO MEMORIA</p> <p>VI: COMPONENTE CONSTRUCTIVO REQUERIMIENTOS REFERENCIAS CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN</p>
	<p>VII: CONCLUSIONES</p> <p>BIBLIOGRAFÍA</p> <p>ANEXOS</p>



01.

Fig 01. Proceso de cultivo in vitro de la cepa de hongo Pleurotus Ostreatus durante 3 semanas en dos placas petri. Imágenes del crecimiento diario. Elaboración propia.

I. FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En torno al desarrollo de materiales con micelio de hongos filamentosos, por ser un campo incipiente hay diferentes metodologías y parámetros de producción, por lo que los estudios disponibles son fragmentados y no presentan una visión general estandarizada¹. Dentro de este panorama, la presente investigación se sitúa desde el desarrollo del material a la fabricación de componentes, incorporando nuevas tecnologías al compuesto a base de hongos.

¹ Elsacker, E., Vandeloock, 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, 138431.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el concepto de economía circular cobra gran importancia debido a la escasez de recursos, siendo cada vez más relevante en el área de la construcción y la arquitectura¹. Los materiales de construcción tienen una vida útil limitada, y sus procesos de fabricación y desmantelamiento requieren de mucha energía, impactando de forma negativa en el entorno natural. El área de la construcción genera más de 1,1 millones de toneladas de residuos industriales (SINADER, RETC 2015). El sistema productivo y su consumo actual no considera el impacto medioambiental del ciclo de vida completo de los edificios y sus materiales, dejando de lado muchas veces la gestión de desechos tanto en su construcción como en su demolición. Es debido a esto, que se han buscado procesos sostenibles, capaces de avanzar hacia un manejo sustentable de los componentes constructivos en su generación como también en su reutilización. Los compuestos a base de micelio son una clase emergente de materiales ambientalmente sostenibles que están experimentando un creciente interés en la investigación. El potencial productivo del micelio lo ha vuelto popular en las últimas décadas, despertando la atención de distintas disciplinas, ya que permite crear nuevos componentes personalizables. Estos materiales utilizan el crecimiento natural de fibras de hongos como un método de biofabricación para reciclar los abundantes subproductos y desechos agrícolas, para luego convertirlos en alternativas más sostenibles a los materiales de construcción sintéticos de alto consumo energético. La estructura natural de fibras del micelio se presenta como una oportunidad de sustituir parte de procesos industriales químicos con procesos biológicos.

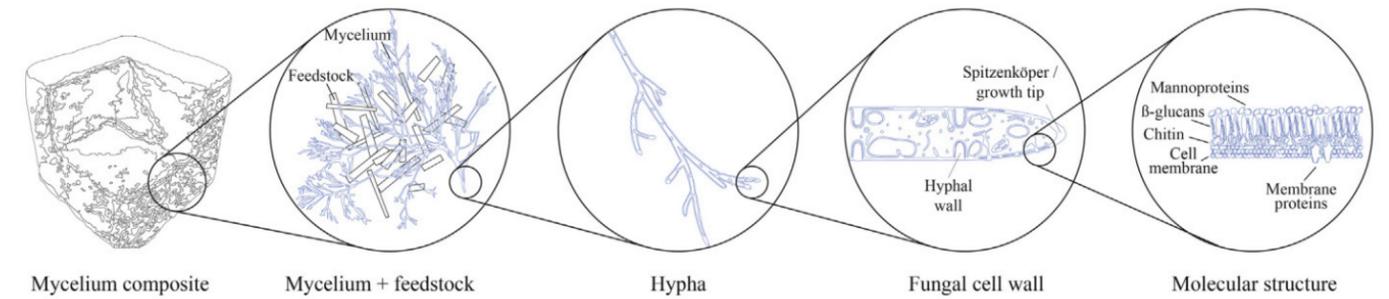
Sin embargo, el conocimiento sobre estos materiales de micelio es relativamente nuevo. En general, los estudios individuales utilizan una amplia gama de enfoques experimentales diferentes y procedimientos no estandarizados², lo que dificulta definir la aplicabilidad del material. La fabricación y características de un componente a base de micelio contempla múltiples variables que pueden afectar su rendimiento final. Desde el tipo de hongo, el tamaño y la clase de sustrato, las condiciones de crecimiento del hongo, el procesamiento del material, el moldeado y horneado, junto con los aditivos, cada una de estas etapas contempla variables que afectan las propiedades finales del material.

OBJETO DE ESTUDIO

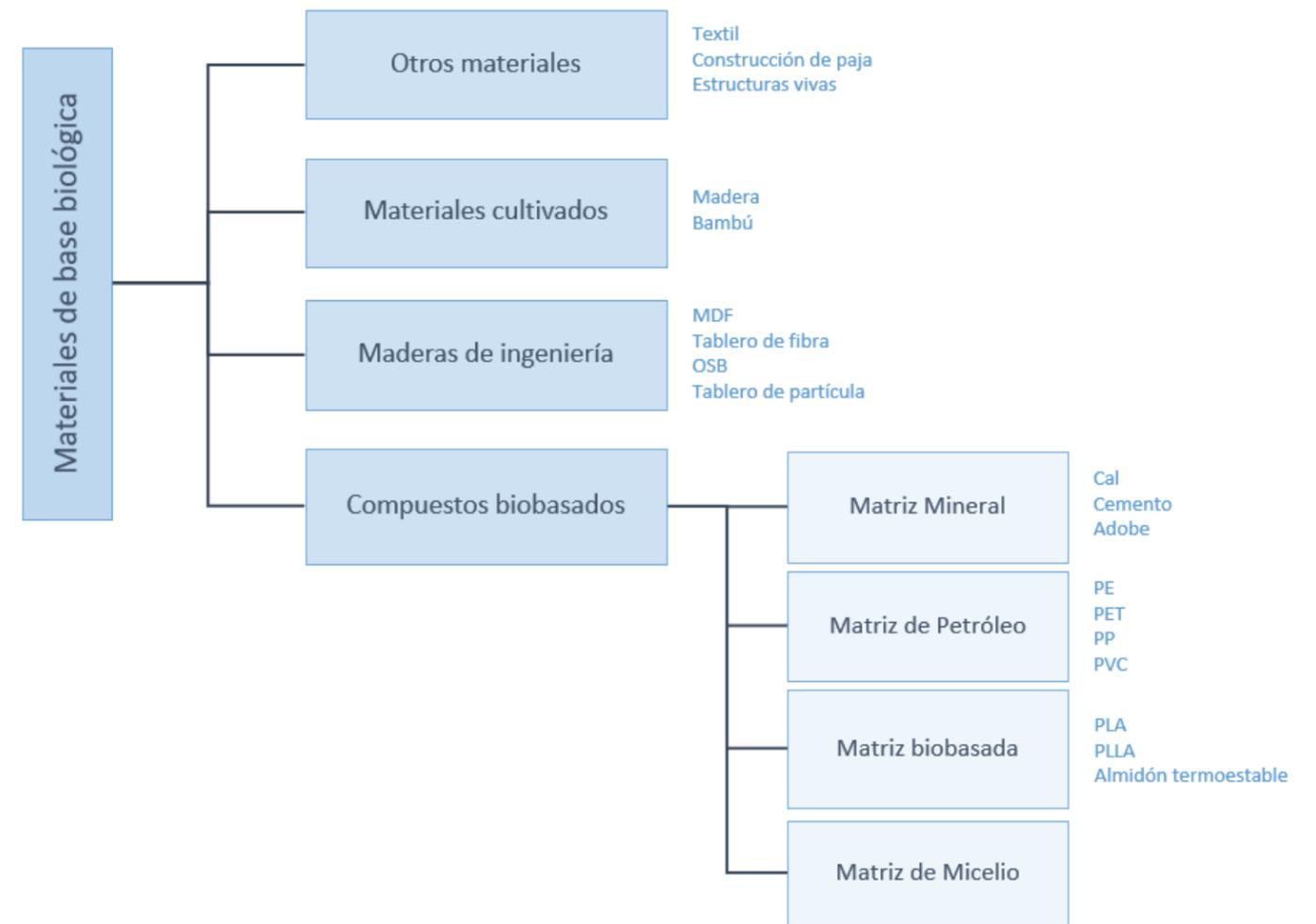
Dado que, hasta el día de hoy, la investigación de los materiales a base de micelio se encuentra enfocada en elementos propios del diseño a pequeña escala, no existe una línea de investigación robusta en torno a la resistencia estructural de un compuesto de este tipo y menos aún, en componentes de desarrollo arquitectónico. En general, la biofabricación con hongos se enfoca en objetos tipo espuma, por lo que su resistencia físico-mecánica no ha sido puesta a prueba con los requerimientos propios de un componente estructural para una construcción.

Actualmente, nos encontramos frente a la posibilidad de ampliar el marco de operaciones del material, desplazando su uso hacia el ámbito estructural, con un foco en el desarrollo consistente y resistente del compuesto de micelio. Se debe resolver, además, su degradación medioambiental y su resistencia no sólo a fuerzas, sino también frente a la abrasión y la intemperie. Una de las formas de operar con este material del tipo objetual hacia un componente arquitectónico, es pensar en un componente compuesto.

En ciencia de materiales, reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales³. Frente a esto, nos encontramos con la posibilidad de combinar el material de micelio con otros elementos, capaces de mejorar sus características para convertirlo en un componente compuesto. Este componente puede, por un lado, recoger las virtudes del material a base de micelio, como lo son su liviandad y capacidad aislante y, por otro lado, suplir las deficiencias con otros materiales. Al tratarse de un componente multicapa, se contempla un proceso previo de la integración de estos elementos, de forma análoga a un componente prefabricado, con sus tecnologías aplicadas desarrolladas en la industria. El objetivo de integrar el material de micelio con otros materiales es el de potenciar sus virtudes y a la vez ofrecer mayores prestaciones para su uso como componente arquitectónico de fácil montaje en una cubierta.



02.



03.

1 Ruiz, L. A. L., Ramón, X. R., & Domingo, S. G. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector—a review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119238.

2 Elsacker, E., Vandeloos, 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, 138431.

3 Callister, W. D. (2019). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.

Fig 02. Representación esquemática del micelio en distintas escalas. Fuente: Elsacker, E., Vandeloos, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composite.

Fig 03. Categorización de materiales biobasados. Elaboración propia. Adaptado de: Lelivelt, R., Lindner, G., Teuffel, P., Lamers, H., & SD, U. S. D. (2015). The mechanical possibilities of mycelium materials. Eindhoven university of technology (TU/e).

PREGUNTAS

En esta investigación, el objeto de estudio es el de evaluar el desarrollo de un componente constructivo a base de micelio, análogo a un panel prefabricado para cubiertas de fácil montaje, con propiedades similares a las de un tablero estructural de madera.

En la escala microscópica, en orden de incrementar la resistencia estructural de un material originalmente espumoso, es necesario resolver lo siguiente:

¿Cómo y que variables influyen en el incremento de resistencia de un material a base de micelio, análogo a tableros de madera estructural, capaz de ser utilizado para la construcción de una envolvente arquitectónica con cualidades térmicas y estructurales?

En la escala arquitectónica, es importante considerar que el componente, al ubicarse en una cubierta, debe ser capaz de enfrentarse a la intemperie, por lo que se propone integrar un material impermeable:

¿De qué manera se puede configurar un componente integrado susceptible a cubrir superficies expuestas al exterior y sus condiciones climáticas, protegiendo la envolvente de un centro de interpretación en el sur de Chile?

HIPÓTESIS

Un componente integrado a base de micelio con una membrana impermeable, desarrollado a partir de un proceso de biofabricación adecuado, en un formato óptimo y análogo a los paneles estructurales de madera, capaz de resistir la humedad y la abrasión, es susceptible de ser utilizado como solución constructiva resistente y aislante para la construcción de una envolvente arquitectónica de cubierta ubicada en el sur de Chile. Mediante la integración de otro material para conformar un componente con diferentes prestaciones es posible suplir las deficiencias del material a base de micelio, el cual puede ser puesto a prueba en una cubierta, aspecto desafiante y demandante respecto a los agentes ambientales presentes en la zona austral del continente americano.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la posibilidad de generar un componente a base de micelio de hongo a partir del crecimiento de éste con sustratos de origen agrícola y fibras naturales, capaz de tener aplicaciones en la industria de la construcción.
- Proyectar un componente integrado que contemple un material de origen natural basado en micelio y una membrana capaz de proteger el compuesto de la humedad y el agua presentes en un ambiente exterior.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el formato, espesor y tamaño del componente a partir de las limitaciones presentes en el material de origen natural.
- Establecer la forma con la cual se integrará el tablero de micelio con la membrana impermeable para lograr un componente consistente y competitivo con otros paneles compuestos.
- Evaluar el tipo de unión con el cual se deba ensamblar los componentes a base de micelio sin dañar o limitar las propiedades aislantes y resistentes de éste.

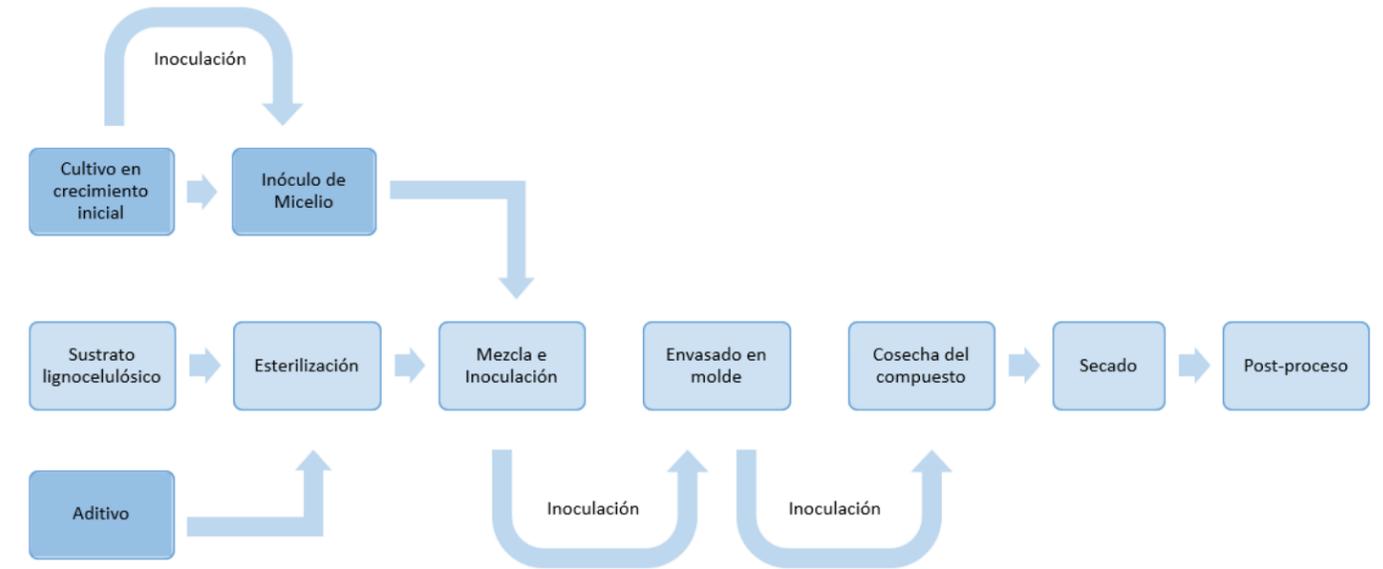
METODOLOGÍA

En la presente investigación, la metodología se divide en cinco pasos:

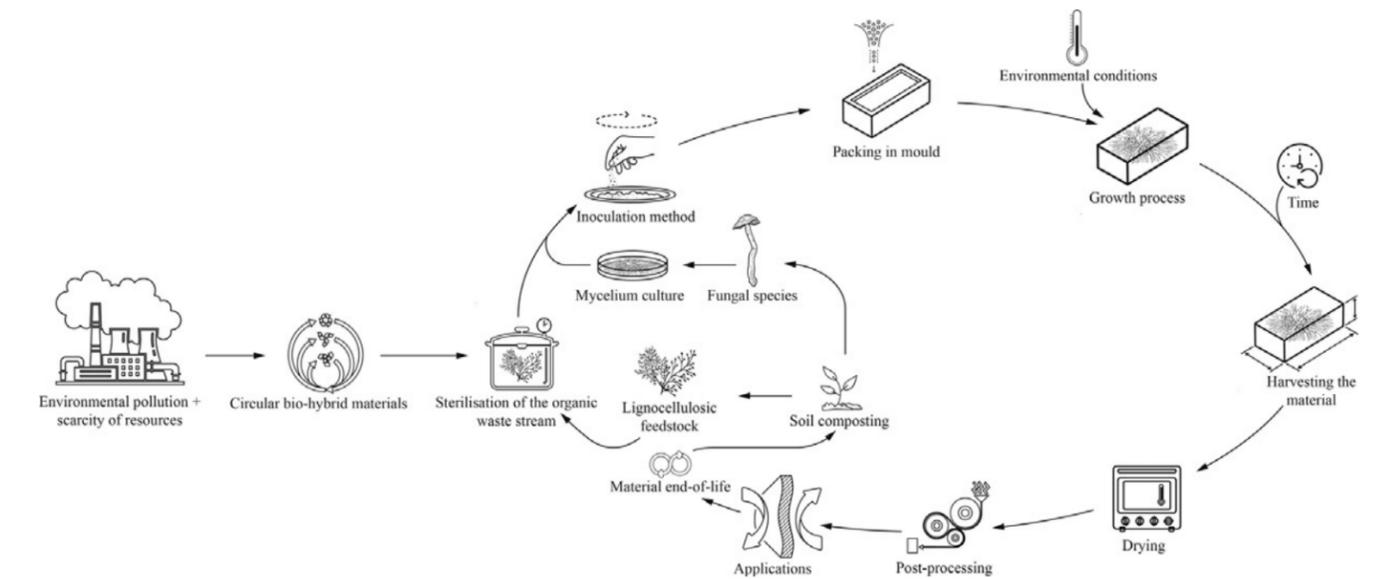
En primer lugar, una investigación de la literatura existente respecto a los procesos de biofabricación de compuestos a base de micelio, explorando metodologías previas y experimentos replicables.

En segundo lugar, se propone investigar sobre tableros de madera y los procesos de producción de éstos, como su configuración y clasificación en el contexto de la prefabricación modular de componentes constructivos aplicables en el diseño arquitectónico.

En tercer lugar, se contempla realizar experimen-



04.



05.

tos a partir de los antecedentes bibliográficos investigados, poniendo a prueba la hipótesis generada y buscando dominar el proceso de moldeo, dando forma al componente en orden de alcanzar los objetivos propuestos.

En cuarto lugar, se propone proyectar un componente constructivo autónomo, análogo a paneles prefabricados de fácil montaje, para ser utilizado en la cubierta de una envolvente arquitectónica ubicada en los bosques subantárticos del sur de Chile.

Finalmente se integra el componente en la cubierta de un proyecto de arquitectura complejo para poner a prueba su condición arquitectónica com-

positiva y constructiva, junto con su capacidad de replicabilidad y repetición.

Fig 04. Diagrama de flujo del proceso que muestra el método de fabricación aplicado de los compuestos a base de micelio. Elaboración propia. Adaptado de: Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites.

Fig 05. Gráfico resumen de "A comprehensive framework for the production of mycelium-base lignocellulosic composites". Fuente: Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites.



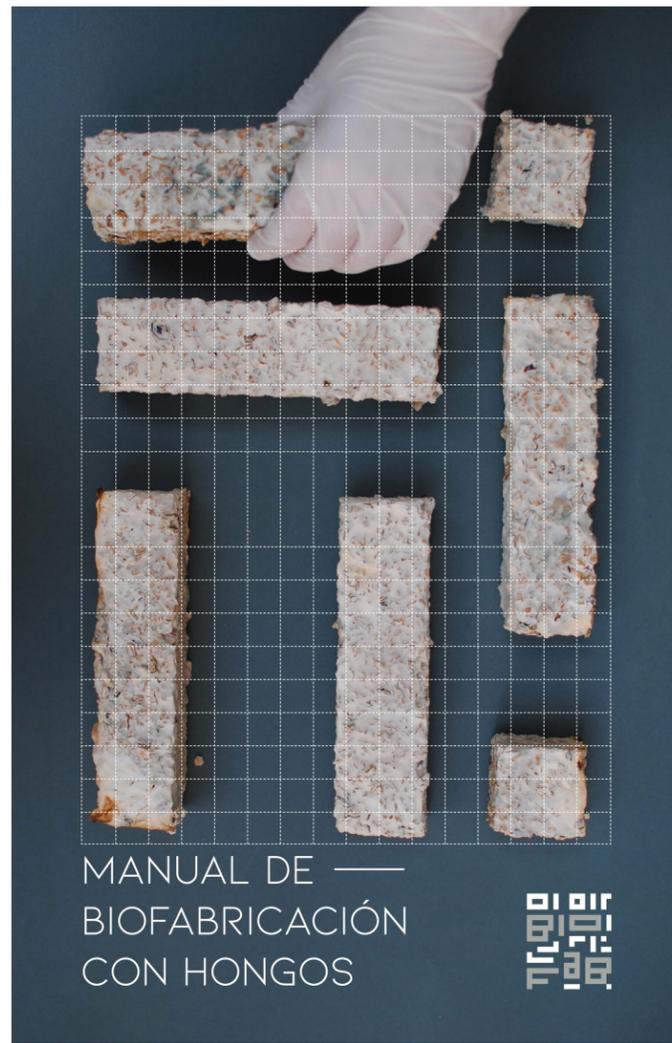
06.

Fig 06. Proceso de crecimiento de spawn en arroz integral con la cepa de hongo Pleurotus Osreatus. Elaboración propia.

II. ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan los antecedentes que permitieron desarrollar la base teórica para el desarrollo del material biobasado. En esta investigación, al momento de referirse a un material biobasado, se utilizará la definición dada por R.J.J. Letivelt: "un material del que al menos uno de los componentes puede ser cultivado biológicamente y es totalmente renovable"⁴.

⁴ Lelivelt, R., Lindner, G., Teuffel, P., Lamers, H., & SD, U. S. D. (2015). The mechanical possibilities of mycelium materials. Eindhoven university of technology (TU/e).



07.

Fig 07. Portada del Manual de Biofabricación con Hongos, desarrollado por el laboratorio de biofabricación UC. Introducción: En este manual te enseñaremos cómo fabricar tus propios materiales y objetos a partir de hongos nativos descomponedores de madera y desechos agroforestales. Esto puede sonar complejo o incluso difícil de imaginar, pero en realidad se trata de algo bastante similar a cocinar, o mejor dicho, a cocinar bien. Por ejemplo, cuando preparamos un pan con masa madre, lo primero que tenemos que hacer es preparar el inóculo (la masa madre) y esperar a que organismos microscópicos la colonicen, se alimenten de ella y cambien su composición. Una vez lista, podemos comenzar con la preparación de la masa del pan, la que luego de varios procesos de fermentación podrá finalmente ir al horno para ser cocinada. Pues bien, aquí se trata de algo similar: buscar los ingredientes correctos, seguir la receta y, con mucha paciencia, experimentar una y otra vez hasta que tengamos el material que nos guste o que sea funcional para nosotros. Al igual que en la cocina, el compartir las recetas, los conocimientos asociados y las fuentes de los ingredientes es fundamental para que todo el mundo pueda tener acceso a estas tecnologías. Es por esta razón que compartimos nuestras investigaciones a través de este manual y que invitamos a nuestros lectores a que compartan sus descubrimientos. Ahora los invitamos a probar, jugar y experimentar con la posibilidad de construir sus propios objetos y materiales, y junto con ello, los invitamos a ser parte de nuestra comunidad de investigación y biofabricación.

El presente trabajo se inscribe en la investigación en base a fabricación con micelio desarrollada por el equipo del laboratorio de Biofabricación UC⁵. Iniciada en el año 2017, sus objetivos son desarrollar investigación aplicada en torno a proceso de fabricación que involucran el uso de micelio de hongos descomponedores de celulosa, buscando la producción de biomateriales y la divulgación de los procesos y las tecnologías involucradas.

En dicha iniciativa participan investigadores de las Facultades de Ciencias Biológicas, Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente se aloja en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos (FADEU) de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

BIOFABRICACIÓN

Hablar de diseño y biofabricación significa hablar de materiales y productos generados a partir de moléculas orgánicas tales como proteínas y carbohidratos; células y sus distintas formas de organización, pasando desde tejidos a organismos pluricelulares complejos; llegando a considerarse incluso el uso de moléculas inorgánicas como el CaCO₃ (carbonato de calcio), el cual cumple roles estructurales vitales en diversos organismos. También significa hablar de procesos productivos, ciclos de vida, economías circulares, sustitución de materiales sintéticos fabricados a gran escala o fabricación de componentes compatibles con otros organismos vivos.

Durante los últimos años, las tecnologías de biofabricación y el desarrollo de biomateriales han permitido instalar una agenda centrada en la obtención de biomateriales renovables, cuya producción y ciclo de vida tiene el potencial de reducir el impacto en el medio ambiente, permitiendo articular de forma eficiente y territorial las necesidades de las comunidades en relación con la disponibilidad de sus materias primas y requerimientos propios del usuario final.

Considerando esto, el éxito en la implementación de estas tecnologías no depende exclusivamente de sus atributos internos (baja huella de carbono, bajo consumo energético, uso eficiente de los re-

curso naturales, etc.), sino que también se vincula con el modo en que se concibe los procesos de investigación, producción y divulgación en relación al territorio, la gestión de las comunidades locales involucradas, el modo en que se administra la propiedad de los medios de producción, la procedencia de los insumos y el manejo de los desechos vinculados al proceso productivo, además de la forma en que los productos derivados de estas nuevas industrias se comercializan y compiten en el mercado. (Chateau, Romero, Rodríguez y Elliott 2019)

FABRICACIÓN CON MICELIO Y LABORATORIO DE BIOFABRICACIÓN UC

Entre el año 2018 y el 2019 se llevan adelante tres proyectos de investigación complementarios, orientados a instalar en el Laboratorio de Biofabricación UC las capacidades para producir materiales conformados por el micelio de hongos y residuos agroindustriales. Se proyectó en estos dos años testear sus posibilidades en el ámbito de la arquitectura y el diseño para posteriormente prototipar una línea de producción de escala industrial orientada a la producción de bloques estructurales de micelio. De esta forma, se buscó validar empíricamente la hipótesis de que es posible producir materiales resistentes en base a micelio y sustratos lignocelulósicos con un uso útil para componentes constructivos, fabricados a una escala apropiada para la industria, proporcionando una alternativa efectiva de materiales con baja huella ecológica y posibilidades de integrarse efectivamente en un ciclo que abarque la fabricación, el uso y la descomposición.

La experiencia se llevó a cabo en colaboración Rafael Astaburuaga Armanet y la empresa Hongos de Chile —entidad privada dedicada a la producción industrial de champiñones comestibles—, los que permitieron el despliegue in-situ de un “laborato-

rio de campaña” para el escalamiento de los procesos de inoculación y cultivo ensayados en el laboratorio durante los años 2017 y 2018.

El cultivo, testeo y prototipado involucró dos especies de hongos lignocelulolíticos: *Trametes versicolor* y *Pleurotus ostreatus*, los cuales fueron colectados en el parque Karukinka y la industria agropecuaria, respectivamente. La secuencia completa de cultivo y fabricación se llevó a cabo haciendo uso de ambas especies lo que finalmente llevó a optar por la utilización de *P. Ostreatus* debido a su mayor robustez y velocidad de crecimiento en el rastrojo de trigo, llegando a producirse aproximadamente 250 bloques estructurales de 10 x 20 x 50 cm, con una densidad aproximada de 25 kg/m³; y un protocolo para la producción industrial de estos.

Derivado de esta experiencia, actualmente se trabaja en la caracterización físico-mecánica de los bloques y de forma paralela se busca reproducir, en el Laboratorio de Biofabricación, el proceso desarrollado que se realizó en Hongos de Chile, variando los sustratos con los que se cultiva el micelio para controlar la densidad y resistencia final del material.

Paralelamente, a partir del año 2019, mediante un FONDART de Investigación en Diseño, se desarrolla una investigación alternativa cuyo objetivo fue desarrollar un textil a partir de micelio y fibras naturales, además de una incubadora de bajo costo y de código abierto. Esta última no sólo permite a los interesados replicar los resultados de la investigación, sino que también da la posibilidad de manejar variables de interés en el crecimiento del hongo, otorgando la posibilidad de experimentar en el área sin la necesidad de invertir grandes sumas de dinero en equipamiento. (Chateau, Romero, Rodríguez y Elliott 2019)

5 El laboratorio de biofabricación UC ha participado en diversos proyectos con las siguientes fuentes de financiamiento: 2015 Concurso VRI para desarrollo de seminario Interdisciplinario “Biodesign”. 2016 concurso VRI interdisciplinario en temas de sustentabilidad “BIODISEÑO fabricación de nuevos materiales sustentables”. 2018 FONFART N° 446812, “Biodesign: Diseño de sistemas constructivos de código abierto a partir de hongos nativos”. 2018 Fondo Redsemilla, Centro de Innovación UC, “Biodesign: Diseño de sistemas constructivos a partir de hongos nativos”. 2019 concurso VRI interdisciplinario en temas de sustentabilidad “Desarrollo de bloque estructural de micelio de hongo para construcción de prototipo escala 1:1 en Puerto Williams”. 2019 concurso ArTeCiH, Artes & Tecnologías, Ciencias y Humanidades UC “Monumento Abierto. Escultura de micelio a gran escala para habitar el futuro”. 2019 Fondart N° 503201 - Micotextil. Desarrollo de textil de alta resistencia y código abierto, biobasado en micelio de hongo para su aplicación en indumentaria. 2019 Biomaker Challenge, University of Cambridge, entre otros.

ESTADO DEL ARTE

Uno de los desafíos de nuestra sociedad es la transición hacia una economía circular sostenible y un manejo sustentable de los materiales. Un material biocompuesto particularmente único que ofrece nuevas oportunidades en el diseño y los materiales de construcción es el compuesto a base de micelio, el cual tiene el potencial para tener un impacto significativo en los sistemas de constructivos.

PRODUCTOS Y CARACTERÍSTICAS

A partir de las investigaciones y experimentaciones realizadas en la actualidad, se destacan componentes espumosos, ya que sus propiedades físicas y mecánicas en general son similares a la espuma. Es por esto, que los compuestos a base de micelio se pueden trabajar en áreas de aislación, tanto acústica como térmica, permitido por su estructura liviana, porosa y de baja conductividad térmica. Sumado a esto, se pueden encontrar productos de embalaje a base de micelio que protegen a botellas de vidrio o elementos delicados durante su transporte. Un representante importante que comercializa componentes a base de hongos, es la empresa norteamericana Ecovative, la cual a partir de un diseño ecológico, presenta productos terminados para diversas aplicaciones, desde embalaje, cuero, moda y hasta alimentos. Bajo el nombre de Mycoflex, se presentan espumas para las rutinas de cuidado de la piel y algunas piezas de ropa, como guantes, correas de mochila y espumas de soporte para calzado. Ecovative no solo ofrece espumas, sino también productos MycoComposite, que utiliza micelio como aglutinante biológico autoensamblado para subproductos agrícolas, como cáñamo, maíz y madera. Los productos van desde piezas de embalaje, objetos de interior como lámparas y macetas, hasta paneles de aislación de todo tipo de tamaños y formas.

Fig 08. MushLume Hemi Pendant. L 61cm x W61cm x H 28cm. Grown Bio: Interior Products. Recuperado desde <https://www.grown.bio/product/mush-lume-hemi-pendant-lamp/>

Fig 09. Mycelium Brick. L 20.5 cm x W 10.0 cm x H 6.0 cm. Grown Bio: Building & Architecture Products. Recuperado desde <https://www.grown.bio/product/thin-insulation-panel-set-of-10/><https://www.grown.bio/product/brick/>

Fig 10. Torre Hy-fi por David Benjamin, levantada en el MoMa PS1 en Junio de 2014. Recuperado de: Plataforma Arquitectura

Fig 11. Torre Hy-fi por David Benjamin, levantada en el MoMa PS1 en Junio de 2014. Recuperado de: Plataforma Arquitectura



08.



09.

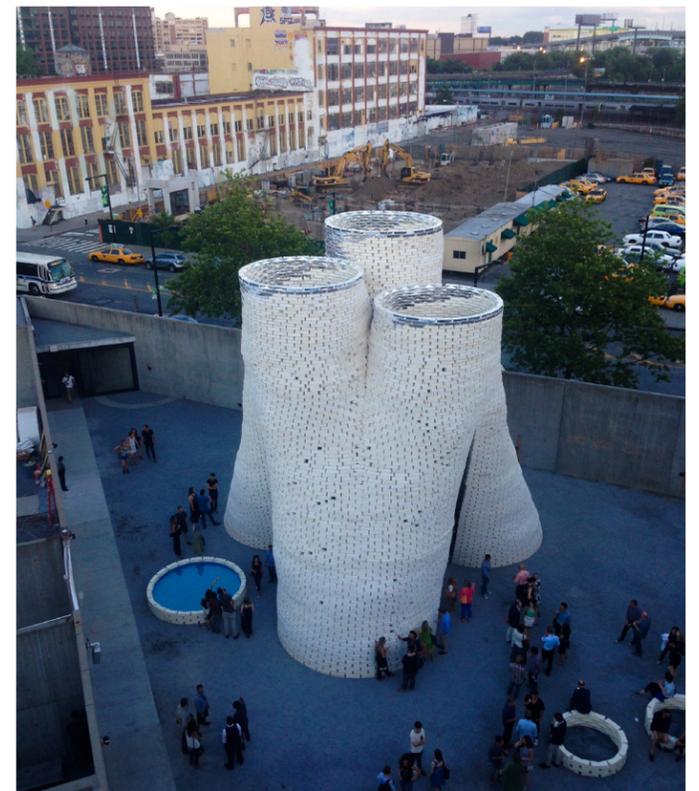
Otra característica que ofrecen los materiales a base de micelio es su capacidad de degradación, es decir, que se puede dejar en la tierra y en 45 días se degrada por completo, según Biofab, una empresa neozelandesa afiliada a Ecovative que trabaja con productos de empaque. Es más, en Grown-bio, otra afiliación de Ecovative, se comercializan urnas compostables, con el fin de que los seres queridos descansen en paz en un suelo fértil para dar una nueva vida. Sin embargo, la biodegradabilidad de los compuestos a base de micelio se presenta como una dificultad al momento de comercializar objetos de larga duración, como paneles de aislación. Para ello, se ha comenzado a aplicar barnices y capas de resinas para proteger los componentes, aspecto en el que ahondaremos más adelante.

ESCALA Y APLICACIÓN

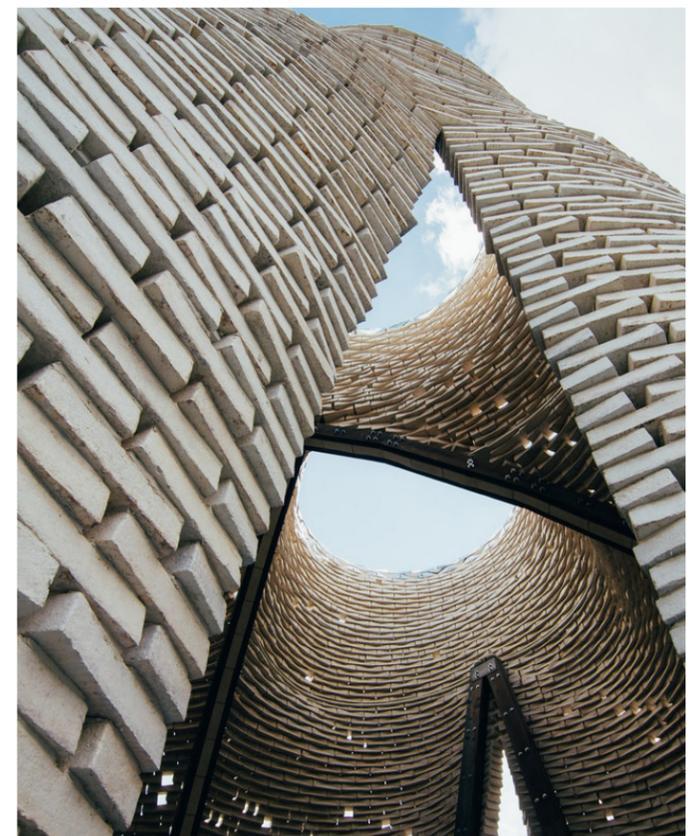
Actualmente, se observa que el enfoque de los materiales a base de micelio es en objetos de diseño, un material aislado a pequeña escala. El micelio crece sobre un sustrato de origen orgánico y el resultado son productos terminados de uso cotidiano para aislar espacios y proteger objetos frágiles. Sin embargo, hay iniciativas que exploran el material como una experiencia de gran escala. Este caso corresponde a la torre Hy-Fi, estructura compuesta a partir de ladrillos de micelio apilados, desarrollada por David Benjamin y el grupo de arquitectos The Living. Hy-Fi es la primera estructura a gran escala que utiliza esta tecnología de ladrillos de hongos, basada en una técnica desarrollada por Ecovative en 2007 y, hasta ahora, generalmente utilizada para fabricar envases. Los ladrillos pueden crecer en 5 días y se apilan para crear una estructura de tres cilindros que se fusionan⁶. Es importante considerar la posibilidad de incorporar un material biobasado en la industria de la construcción, dado los efectos negativos que la producción de materiales no reciclables implica en el medioambiente.

Debido a que el material a base de micelio se desarrolla de forma objetual, como un único material con usos domésticos, no se ha puesto a prueba la resistencia propia del material con los requerimientos propios de un componente estructural. Mayormente se trabaja como un material aislado, a pesar de que su comportamiento junto a otro material, es decir como un componente compuesto o multicapa, ofrece un sinfín de posibilidades estructurales. Por estas razones, esta investigación busca ahondar en las propiedades del material y bajo qué condiciones es posible crear un componente a base de micelio capaz de tener aplicaciones estructurales en la industria de la construcción. En este estudio se desea experimentar con el compuesto de micelio para explorar sus características y posibilidades de aplicación para la construcción de una envolvente en el sur de Chile.

6 Rory Stott. "Hy-Fi, The Organic Mushroom-Brick Tower Opens At MoMA's PS1 Courtyard" 27 Jun 2014. ArchDaily. Accessed 26 Jun 2021. <<https://www.archdaily.com/521266/hy-fi-the-organic-mushroom-brick-tower-opens-at-moma-s-ps1-courtyard>> ISSN 0719-8884

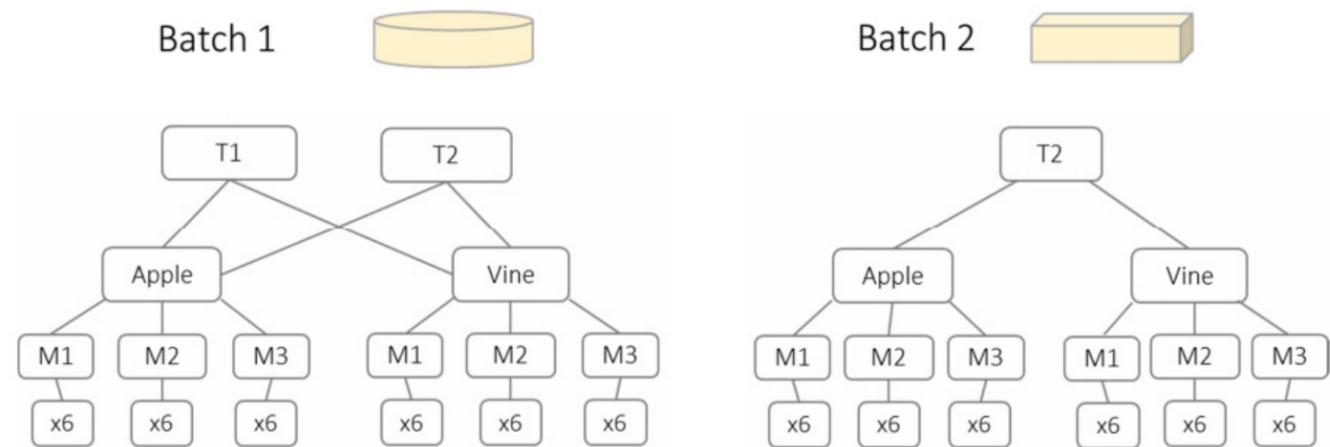


10.



11.

MARCO TEÓRICO



12.

Para el desarrollo de una base teórica, se consultaron artículos, revistas científicas y manuales de biofabricación, con el objetivo de entender el proceso de crecimiento del micelio, la producción del material y las variables involucradas. Las referencias bibliográficas en relación al micelio se clasificaron por su énfasis en variables y aspectos específicos del proceso, que corresponden a las condiciones de crecimiento, el sustrato, las propiedades físico-mecánicas y las variables que inciden sobre ellas.

CONDICIONES DE CRECIMIENTO

El cultivo de hongos no es algo nuevo. Las condiciones de crecimiento del micelio requieren de mucho cuidado y sus procedimientos asociados necesitan de espacios estériles para evitar contaminaciones de cualquier tipo. Respecto a las precauciones del crecimiento y cultivo de hongos, se consultó el *Manual práctico de cultivo de setas, aislamiento, siembra y producción* (Gaitán-Hernández

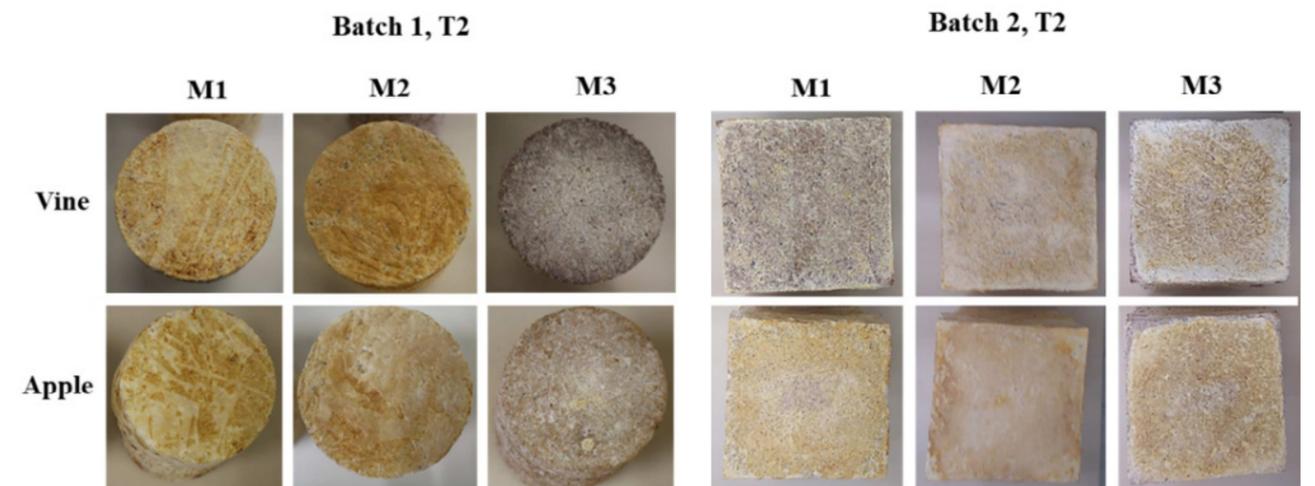
2006)⁷. Este manual tiene la finalidad de dar a conocer de manera sencilla y práctica el proceso de cultivo de las setas, haciendo énfasis en las dificultades que se presentan en distintas etapas de este. Esto es fundamental para la primera etapa de crecimiento del micelio de hongo, pues incide directamente en el desempeño del micelio que colonizará los sustratos y participará en la producción del compuesto.

En esta investigación, se plantea trabajar con *Pleurotus Ostratus*, ya que este es un hongo comestible de rápido crecimiento, según afirma la investigación *Comparative Study of Pleurotus ostreatus Mushroom Grown on Modified PAN Nanofiber Mats*⁸. Sus autores observan, que la quitina de las paredes celulares del micelio de *Pleurotus ostreatus* lo convierte en un candidato prometedor para la estabilización mecánica de las esteras de nanofibras para filtros y otras aplicaciones.

Otro factor para considerar durante la investigación corresponde al tiempo de incubación del

7 Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). *Manual práctico del cultivo de setas: Aislamiento, siembra y producción*. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, México.

8 Sabantina, L., Kinzel, F., Hauser, T., Többer, A., Klöcker, M., Döpke, C., Böttjer, R., Wehlage, D., Rattenholl, A., & Ehrmann, A. (2019). *Comparative study of Pleurotus ostreatus mushroom grown on modified PAN nanofiber mats*. *Nanomaterials*, 9(3), 475.



13.

material de micelio. En previas investigaciones se plantea que el tiempo de incubación puede afectar las propiedades mecánicas y físicas del material. Attias N et. Al. (2019), en su publicación *Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis*⁹, menciona que el mecanismo enzimático de digestión afecta el rendimiento final del material y estima que los periodos de incubación más largos aumentan los cambios en el contenido de lignocelulosa, provocando posibles cambios en las paredes celulares de los hongos.

SUSTRATO

En general, las experimentaciones con micelio tratan la variable del tipo de hongo, comparando diferentes cepas o mutaciones del mismo micelio. Sin embargo, otra variable fundamental corresponde al sustrato, tanto su tamaño como contenido de celulosa y lignina, alimento principal de los hongos xilófagos. En esta investigación, se propone pro-

bar con dos sustratos, uno de origen agrícola, que corresponde a la cáscara de nuez, y otro de origen forestal, que corresponde a la viruta de madera de pino. En la metodología se ahondará en mayor detalle respecto a ellos.

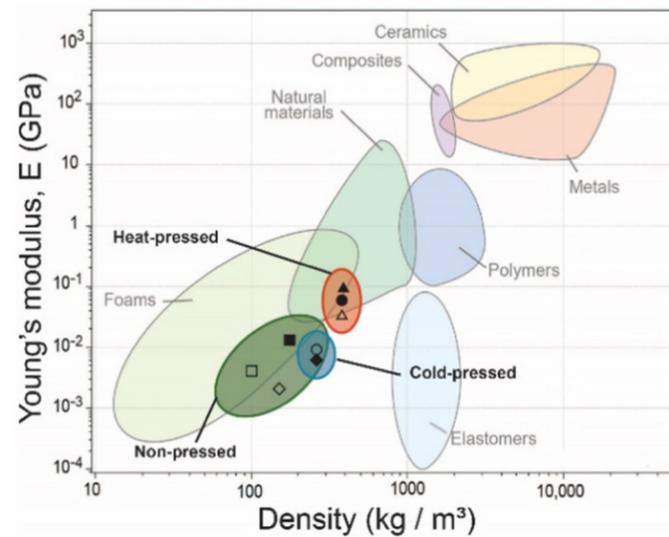
Respecto al sustrato, la cáscara de nuez ha sido parte de experimentos anteriores, como la tesis de Sebastián Rodríguez, diseñador industrial egresado de la Universidad de Chile. En su investigación, *Mycelium: material biobasado, compuesto del micelio del hongo Trametes Versicolor y cáscaras de nuez Juglans Regia*¹⁰, trabaja con cáscaras de nuez, afirmando que es uno de los mayores desechos frutícolas generados en la industria chilena, y al mismo tiempo una alternativa de uso como materia prima para los compuestos a base de micelio.

La madera, al ser la principal fuente de alimento de los hongos xilófagos como *Pleurotus Ostreatus*, se presenta como sustrato en múltiples publicaciones, de las cuáles se destaca la de Attias N et. Al. (2019)¹¹. En este artículo, se experimenta con

9 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, 119037.

10 Rodríguez, S. (2016). *Mycelium: Material biobasado, compuesto del micelio del hongo Trametes Versicolor y cáscaras de nuez Juglans Regia* (<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143763>) [Tesis, Universidad de Chile]. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/cl/>

11 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, 119037.

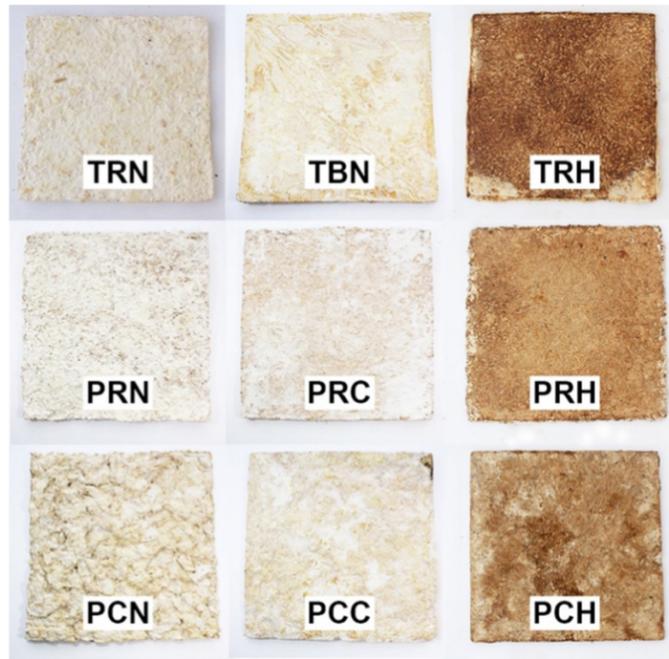


14.

hongos saprófitos y sustratos de residuos de poda de árboles de manzana y vid, los cuales se consideraron como los más compatibles con todas las especies de hongo analizadas (trametes versicolor y multicolor, ganoderma sésil). En este paper, la densidad de los materiales finales dependió de la combinación de las propiedades del sustrato y de la especie de hongo, siendo la vid con ganoderma la que dio la estructura más densa, que se correspondió con la menor absorbencia de agua y las mejores propiedades mecánicas. En este experimento se indica una clara correlación entre la densidad del material y la resistencia a la compresión.

PROPIEDADES

En torno a las propiedades que pueden tener los materiales a base de micelio, existen referencias relevantes que describen las características que estos materiales pueden adquirir, como su aislación térmica, resistencia y absorción de agua. El primer estudio que informa sobre la densidad seca, el módulo de Young, la rigidez a la compresión, las curvas de tensión-deformación, la conductividad térmica, la tasa de absorción de agua y un análisis FTIR de los materiales compuestos a base de micelio mediante el uso de un protocolo totalmente revelado con *T. versicolor* y cinco tipos diferentes de fibras y procesamientos de fibras, es *Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates*¹². En este experimento, se investiga el proceso de producción y las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales compuestos a base de micelio fabricados con diferentes tipos de fibras lignocelulósicas de refuerzo combinadas con un hongo de podredumbre blanca. Las pruebas realizadas revelan que el rendimiento mecánico de los materiales compuestos a base de micelio depende más del procesamiento de las fibras (sueltas, picadas, precomprimidas y



15.

Fig 14. Gráfico de la familia de materiales del módulo de Young (GPa) frente a la densidad (kg/m³). Los materiales sin prensar, prensados en frío y prensados en caliente forman grupos dentro de los materiales de tipo espuma (TRN, TBN, PRN, PCC, PRC) y naturales (TRH, PCH, PRH). Imagen de [14].

Fig 15. Materiales resultantes del crecimiento de *T. multicolor* sobre aserrín (TBN) y paja con (TRH) o sin (TRN) prensado térmico y crecimiento de *P. ostreatus* sobre algodón con prensado térmico (PCH), prensado en frío (PCC) y sin prensado (PCN) y sobre paja con prensado térmico (PRH), prensado en frío (PRC) y sin prensado (PRN). Imagen de [14].

12 Elsacker, E., Vandeloock, 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), e0213954

13 Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M., & Amstislavski, P. (2017). Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017030.

14 Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M.14 B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64–71.

de arrastre) y del tamaño que de la composición química de las fibras, por lo que el sustrato y su granulometría se considera una variable fundamental dentro del rendimiento físico-mecánico del material.

Los autores afirman, que los compuestos de micelio pueden cumplir con los requisitos de las espumas de aislación térmica y tienen el potencial de sustituir a los compuestos de base fósil. Junto con Elsacker, los autores de la publicación *Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam*¹³ afirman que las características aislantes de su bioespuma a partir de micelio son comparables con las características de espumas térmicas poliméricas.

Una de las ventajas de este tipo de compuesto, son sus propiedades materiales personalizables basadas no sólo en su composición y proceso de fabricación, sino también en la etapa final. Para ello, esta investigación se basa en resultados de investigaciones anteriores que demuestran que, cambiando ciertos factores en el proceso de fabricación, se pueden lograr diferencias en el rendimiento de los materiales a base de micelio. Una de ellas, se encuentra en el artículo *Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites*¹⁴. Sus autores afirman, que los resultados demuestran que la presión en calor de sus muestras hizo que los compuestos de micelio pasaran de un rendimiento similar a la espuma a un rendimiento similar al del corcho y la madera (Figura 14). En su investigación se utilizaron varios sustratos y cepas de hongos, y diferentes tipos de prensado, los últimos significaron los mayores cambios en sus propiedades físico-mecánicas (Figura 15).

Finalmente, a partir de estas referencias se plantea una investigación que experimente con compuestos a base de micelio con sustratos de origen agrícola y forestal, observando su composición, aspecto y funcionalidad respecto a los objetivos presentados anteriormente.



16.

Fig 16. Detalle de tablero de sustrato de cáscara de nuez y cepa *Pleurotus Ostreatus* recién desmoldado. Elaboración propia.

III. METODOLOGÍA

La investigación consiste en probar y experimentar con muestras de micelio de hongo y sustrato de origen agrícola y fibras naturales para evaluar las capacidades del material. Se estima que el proceso de biofabricación de un componente a base de micelio cuyo crecimiento del hongo se realiza en condiciones térmicas adecuadas, con un sustrato lignocelulósico y a través de procesos de crecimiento de alta densidad en el molde y bajo presión, con un procedimiento óptimo de secado y horneado, podría ser capaz de desarrollar un material con propiedades físico-mecánicas aptas para ser aplicables de forma estructural y comparables con tableros resistentes de madera y corcho. Para ello se hace una revisión histórica de materiales compuestos de elementos orgánicos como tableros de madera, contemplando sus procesos, condiciones y restricciones.

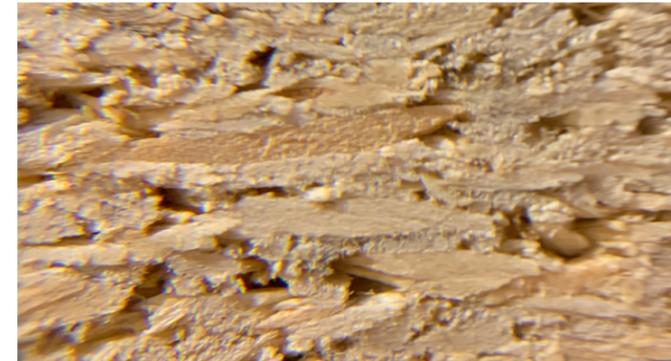
TABLEROS DE MADERA



17.



19.



18.

En la producción del material de micelio, se observa una gran similitud con los tableros de madera, como lo es su estructura de fibras fragmentadas unidas por una matriz de aglomerante. En el caso de los tableros, dependiendo del tipo, nos encontramos con astillas y aserrín unidos a partir de un aglutinante como el formaldehído. En el caso de los materiales de micelio, son las hifas del hongo las que colonizan el sustrato, el cual también tiene un origen orgánico. Es por esto, que se hace una revisión histórica de los tableros de madera con énfasis en los procesos de producción y los elementos que incorpora el material.

HISTORIA

La evolución tecnológica y los nuevos procesos de fabricación han permitido la creación de múltiples tableros de madera a lo largo de la historia. Existen varios tipos de tableros de madera, por lo que sus definiciones varían según sus componentes y procesos de fabricación. En esta investigación se consideran relevantes 2 tipos de tablero: tablero de fibras y tablero aglomerado. El primero corresponde a un panel producido a partir de fibras lignocelulósicas con aplicación de calor y presión, cuya unión se puede deber a resinas sintéticas añadidas o las propiedades inherentes a las fibras

en el proceso húmedo. Por otro lado, los tableros aglomerados son paneles fabricados bajo presión y calor a partir de partículas de madera que se presentan de forma irregular y otros materiales lignocelulósicos con la adición de un adhesivo¹⁵.

La producción del tablero de fibras como proceso húmedo tuvo inicialmente el mismo principio que el proceso de producción del papel. A fines del siglo XIX, se desarrollaron fábricas que utilizaron el papel como materia prima, obteniendo tableros aislantes de baja densidad. Ya en el siglo XX, se descubrió que una manta de fibras de madera comprimida en una prensa caliente producía un tablero de fibras duro conocido como Tablex o HDF¹⁶. La gran resistencia de estos tableros se consigue de forma natural gracias a las propiedades termoplásticas de la lignina con aplicación de presión y calor. Por otro lado, la producción del tablero de fibras por proceso seco dio lugar al tablero MDF¹⁷, el cual data de 1966 en Estados Unidos.

La producción del tablero aglomerado tiene su origen en Bremen, Alemania en 1941, usando la resina fenólica como adhesivo¹⁸. Desde ese momento, se observa un desarrollo explosivo de los tableros, gracias al desarrollo de modernas resinas termoendurecibles.

15 Fernández González, A. (1993). Evolución del mundo tecnológico de los tableros de madera. 4, 273-282.

16 El tablero de fibra de alta densidad, también conocido como HDF, es un tipo de tablero de fibras caracterizado por su mayor densidad, lo que le confiere características diferenciadas del tablero de fibra de densidad media. Fabricado exclusivamente a partir de madera y agua, sin el añadido de adhesivos artificiales.

17 El fibropanel de densidad media o MDF es un producto de madera reconstituida que se obtiene descomponiendo residuos de madera dura o blanda en fibras de madera, a menudo en un desfibrador, combinándolo con cera y un aglutinante de resina, y formando paneles mediante la aplicación de alta temperatura y presión.

18 Fernández González, A. (1993). Evolución del mundo tecnológico de los tableros de madera. 4, 273-282.

ADHESIVOS Y AGLOMERANTES

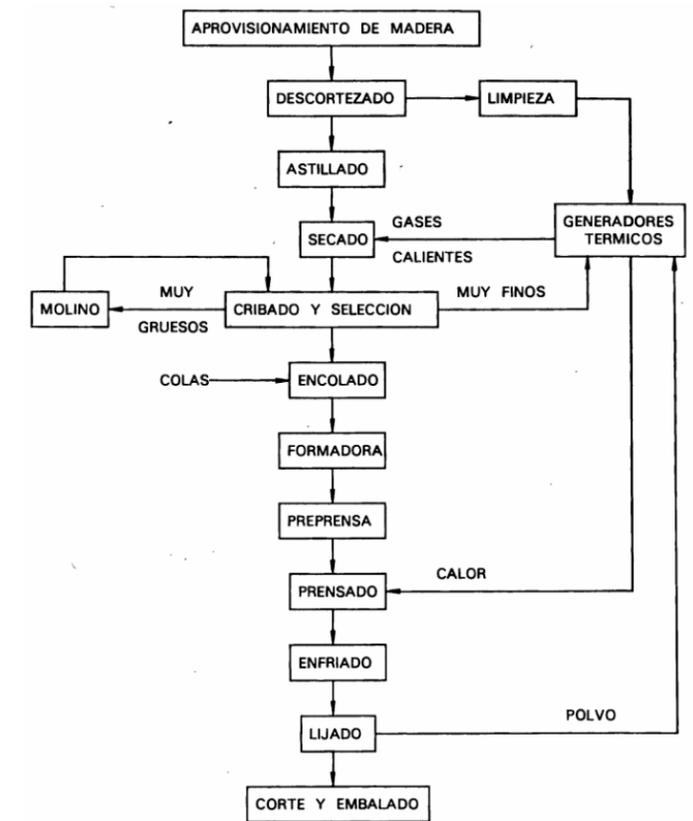
Hasta inicios del siglo XX, todos los adhesivos que se ocupaban eran de origen animal o vegetal. Sin embargo, estas colas naturales tienen baja resistencia al agua y al calor. En 1930 aparecieron las resinas de urea-formaldehído que hoy se usan ampliamente en todos los tipos de tablero. Recientemente se vienen usando también resinas de melamina-formaldehído con gran resistencia al agua¹⁹. Sin embargo, la utilización de los tableros aglomerados en interiores produce la emanación de gas formaldehído, lo cual puede producir efectos adversos en el largo plazo y si se ubican en interiores con baja renovación de aire.

FABRICACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS

Gracias a los avances tecnológicos de la actualidad, los procesos de fabricación de tableros están altamente automatizados. Durante la etapa de la preparación de la madera, se desarrolla un viruteado y cribado de las astillas y deshechos de la industria forestal. Esto consiste en clasificar y separar por tamaño los materiales sólidos, los cuales se pasan por una malla o rejilla con una abertura determinada. Luego, a partir de una cámara de combustión que genera gases de altas temperaturas, se realiza el secado de partículas de madera. A continuación, estas partículas secas son encoladas mediante la adición de resinas. Estas partículas se llevan a la prensa, cuyos platos pueden alcanzar temperaturas de hasta los 200°C²⁰. Finalmente, el tablero es lijado y apilado.

19 Íbidem
20 Ídem

Fig. 17 Detalle de tablero de madera OSB, con aumento de lupa de 40X-25mm. Elaboración propia.
Fig. 18 Detalle de tablero de madera para muebles revestido con melamina, con aumento de lupa de 40X-25mm. Elaboración propia.
Fig. 19 Detalle de tablero de madera MDF, con aumento de lupa de 40X-25mm. Elaboración propia.
Fig. 20. Diagrama de flujo de una fábrica de proceso continuo de tableros aglomerados. Recuperado en "Evolución del mundo tecnológico de los tableros de madera de A. Fernández. (1993).



20.

PRODUCCIÓN DEL MATERIAL



21.



22.

A continuación, se desarrolla un marco teórico práctico que considera las condiciones óptimas para el proceso de biofabricación de un componente resistente a base de micelio. Se investigan productos de micelio terminados y los detalles de su consolidación. Se determinan las variables y se observa el proceso de fabricación de los productos mencionados y se utiliza como ejemplo a validar.

El primer componente de micelio seleccionado corresponde a la panera de Sebastián Rodríguez, diseñador egresado de la Universidad de Chile y miembro del laboratorio de biofabricación UC. Su producto, hecho con sustrato de cáscara de nuez y el hongo *Pleurotus Ostreatus*, presenta una gran dureza y una forma curva que promueve su resistencia. La metodología que utilizó para la biofabricación de la panera se encuentra en su tesis *Mycelium*²¹, donde se determina el proceso de preparación de sustratos, la inoculación de éste con el hongo, su moldaje y terminación.

El segundo componente de micelio que presenta características deseables para el componente a desarrollar corresponde al tablero de un compañero del laboratorio de biofabricación UC, Luciano Cuq. Este tablero tiene una dureza similar a la de un tablero, por lo que ofrece propiedades resistentes muy altas. De un tamaño reducido, el componente está hecho de fibras naturales de madera de pino y también fue colonizado por *Pleurotus Ostreatus*.

21 Rodríguez, S. (2016). *Mycelium: Material biobasado, compuesto del micelio del hongo Trametes Versicolor y cáscaras de nuez Juglans Regia* (<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143763>) [Tesis, Universidad de Chile]. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/cl/>

A partir de los productos de micelio mencionados anteriormente, se presenta la metodología óptima para la producción del tablero resistente de micelio.

En primer lugar, se considera la selección de la cepa, la cual corresponde al hongo *Pleurotus Ostreatus*. La cepa fue seleccionada a partir de investigaciones previas, debido a su rápido crecimiento y capacidad de generación. Además, esta es una de las cepas más conocidas por su condición comestible y se encuentra disponible en todo el mundo. En el paper *Comparative Study of Pleurotus ostreatus Mushroom Grown on Modified PAN Nanofiber Mats*²², sus autores observan, que la quitina de las paredes celulares del micelio de *Pleurotus ostreatus* lo convierte en una opción ideal para la estabilización mecánica de las esteras de nanofibras para filtros y otras aplicaciones. Cabe la posibilidad de que esta cepa permita la generación de un tablero potencialmente resistente. Esta cepa fue la misma que se utilizó para la preparación de los productos 1 y 2.

En segundo lugar, se determina el sustrato. El sustrato seleccionado para esta investigación corresponde, primero a elementos propios de los desechos agrícolas. En Chile, la industria agrícola y forestal genera una gran cantidad de residuos y es por esta razón que se decidió trabajar con subproductos agroindustriales. En esta investigación

22 Sabantina, L., Kinzel, F., Hauser, T., Többer, A., Klöcker, M., Döpke, C., Böttger, R., Wehlage, D., Rattenholl, A., & Ehrmann, A. (2019). Comparative study of *Pleurotus ostreatus* mushroom grown on modified PAN nanofiber mats. *Nanomaterials*, 9(3), 475.



23.



24.

se utilizarán dos tipos de sustrato; cáscara de nuez y viruta de madera. La cáscara de nuez, como subproducto agrícola fue seleccionada debido a su dureza y composición, similar a los sustratos lignocelulósicos y su uso en el producto 2. En segundo lugar, se considera un sustrato de origen lignocelulósico, como el utilizado en el producto 1, correspondiente a la viruta de madera de pino. Es importante considerar que el origen de los sustratos es nacional, por lo que no hay importaciones involucradas.

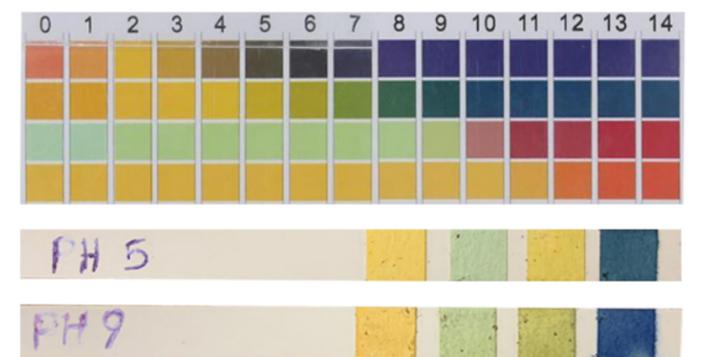
A continuación, se sigue la metodología del laboratorio de biofabricación UC, determinada por el biólogo y arquitecto Matías Elliott, quien ha desarrollado múltiples productos y tiene experiencia directa con el crecimiento del material en condiciones óptimas. El sustrato debe ser esterilizado en una autoclave para luego ser inoculado con la semilla de hongo. Este material se deja crecer unos días en bolsas plásticas para luego ser ubicado en moldes específicos, dentro de los cuales crecerá y se adaptará a su forma. Este proceso tarda alrededor de una semana. En la tabla adjunta (Figura 25), se observan los ingredientes utilizados para el material de micelio. El aditivo de cal es fundamental, ya que aumenta el pH de la mezcla para acercarse al pH ideal para el hongo *Pleurotus Ostra*, que suele ser más básico (Figura 26).

Fig 21. Panera de micelio y cáscara de nuez, desarrollado por Sebastián Rodríguez para su tesis: *Mycelium*. (2015). Elaboración propia.
Fig 22. Tablero de micelio y viruta de madera, desarrollado por Luciano Cuq para el Taller de Biomateriales de micelio.(2020). Elaboración propia.

Ingredientes	Cantidad (gr)	Cantidad (respecto al total)
Cáscara de pistacho	2250	41%
Cáscara de nuez	1400	25%
Viruta de madera roja	1750	34%

Aditivos	Cantidad (gr)	Cantidad (respecto al total)
Cal	8,1	1,50%
Harina	54	10%
Micelio (P. Ostra)	81	15%

25.



26.

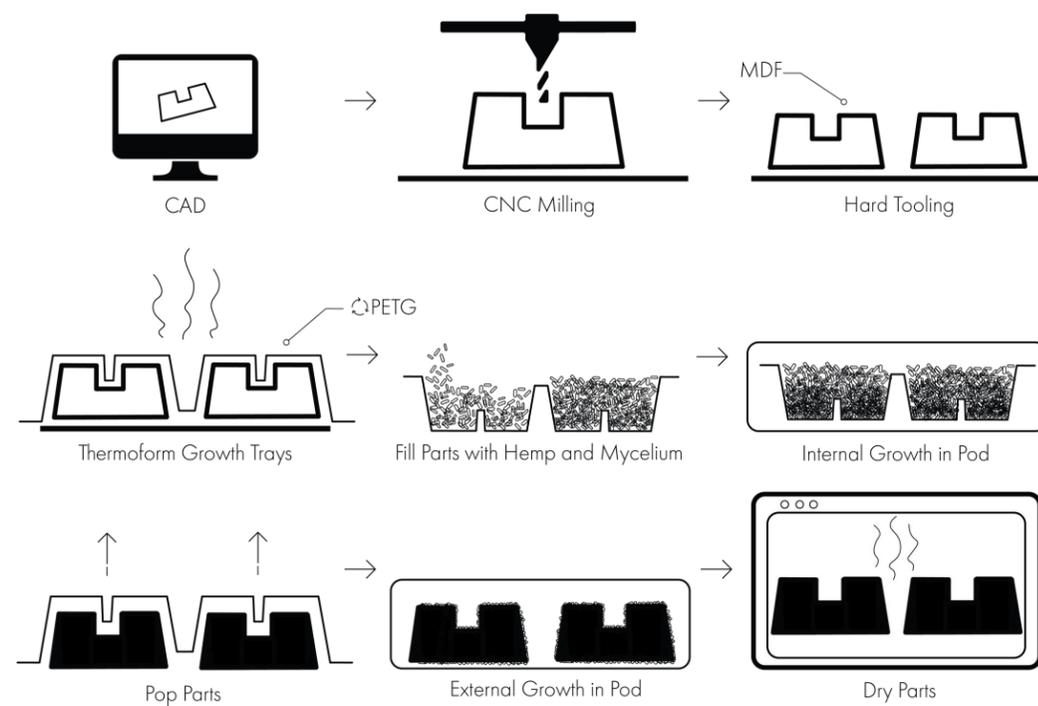
Fig 23. Detalle de panera de micelio y cáscara de nuez, desarrollado por Sebastián Rodríguez con una lupa de aumento 40X-25mm. (2021). Elaboración propia.

Fig 24. Detalle de tablero de micelio y viruta de madera, desarrollado por Luciano Cuq con una lupa de aumento 40X-25mm (2021). Elaboración propia.

Fig 25. Tabla con los ingredientes destinados a la mezcla del material de micelio. Elaboración propia.

Fig 26. Tira reactiva indicadora de pH junto a dos tiras utilizadas para medir el pH de la mezcla. Los valores de pH previo a la integración de cal (pH=5) y posterior (pH=9). Elaboración propia.

MOLDEADO Y HORNEADO



27.

Una de las ventajas de trabajar con el material de micelio es que se le puede dar cualquier forma, todo dependerá del molde en el que se deje crecer. Debido a esto, en orden de generar un prototipo del componente de micelio, es necesario tener el molde dentro del cual se ubicará el material. Respecto a este proceso, se encontró el siguiente esquema, de la empresa comercializadora de productos de micelio Ecovative. En la figura 27, se detallan las etapas del proceso que implica generar un molde apto para el crecimiento del material de micelio en su interior. En primer lugar, se genera un modelo del objeto, el cual es construido a partir de una máquina CNC en madera. Luego, el objeto es ubicado bajo una termoformadora, la cual calienta un plástico que toma la forma exterior del objeto. Este plástico es el molde donde crece el material de Ecovative, que consiste en un sustrato de Hemp (cáñamo) colonizado por micelio. Luego de que el material haya crecido por completo, se desmolda y

se deja crecer unos días para que genere una capa protectora en su superficie. Finalmente, el material es secado en un horno, para asegurarnos de que el micelio deje de crecer.

A partir de lo que se realiza en la fábrica de Ecovative, se desarrolla un molde de polietileno de alto impacto con la forma del componente a una escala 1:10. El prototipo se realizó en primer lugar en madera, el cual se utilizó en la termoformadora para obtener el molde plástico. El molde, al ser tridimensional, lleva una capa exterior y una capa interior, para mantener el espesor del material. Siguiendo la metodología de la fabricación de tableros de madera, es decir, que el crecimiento del molde sea bajo presión para obtener un material más resistente y de mayor densidad, se utilizan pernos y tuercas para ajustar y mantener presionado el material durante su crecimiento.

Fig 27. Proceso de producción de Mushroom Packaging" Nuestros diseñadores generan un modelo en 3D de su inserto de Mushroom® Packaging y trazan un positivo de tamaño real utilizando una máquina CNC. Termoformamos el positivo para hacer bandejas de crecimiento de PET, que se reutilizan cientos de veces y son reciclables. Las bandejas se llenan con MycoComposite™, una mezcla de cañas de cáñamo y micelio, y se dejan crecer durante 4 días. Después de 4 días, las piezas de embalaje se sacan de la bandeja y se dejan crecer durante otros 2 días, lo que crea una capa aterciopelada de sobrecrecimiento. Por último, las piezas se secan para desactivar el crecimiento futuro.

TERMINACIONES

En orden de utilizar el componente generado, es necesario tomar ciertas medidas para su aplicación en una envolvente. En primer lugar, se presenta el problema del carácter hidrofílico del micelio. Esto se debe a la presencia de fibras naturales del sustrato, que son sensibles a la humedad. La alta absorción del agua conduce a un aumento de volumen del componente, creando tensiones entre los materiales que lo acompañan²³. En segundo lugar, se observa el problema de cómo conectar el componente con otros elementos, evitando que se dañe, ya que, de forma similar al poliestireno, es posible que se quiebre en sus bordes. En tercer lugar, se contempla una forma de alargar su vida útil, debido a la alta biodegradabilidad del componente.

Una vez contemplados los problemas de ubicar el componente en una envolvente arquitectónica, se presentan las posibilidades para solucionar los aspectos de impermeabilidad y resistencia del elemento. Como primera instancia, se considera aplicar resinas y/o aceites naturales como revestimiento de base biológica. La idea, en este caso, es la de sellar los poros del material y aumentar sus propiedades mecánicas. Al dejar el material fuera del molde unos días, éste desarrolla una piel protectora en la superficie que se encuentra en contacto con el aire. Como esto no es suficiente, se considera otra medida. Tanto la resistencia como la rigidez se mejoran mediante la infusión de una biorresina en las pieles de refuerzo del compuesto de micelio cuando se utiliza como estructura de sandwich²⁴. Por ejemplo, Philip Ross utiliza tanto el aceite de linaza como la goma laca para conservar y proteger sus muebles a base de hongos, los cuales desinfecta previamente antes de añadir este tipo de protección. Para los acabados de madera interior, se utilizan oleos y aceites de origen natural, como el aceite de tung, o también el aceite de linaza, hidratando e impermeabilizando la forma

de la madera, debiendo ser retocados cada cierto tiempo²⁵. En Ecovative, trabajan con una colada de cal y agua para proteger sus productos. En el caso del micotextil, se utiliza un recubrimiento de proteína de soja, glicerol e hidróxido de sodio²⁶.

Para determinar el revestimiento de base biológica, se aplicaron múltiples barnices a pequeños bloques de micelio, obteniendo diferentes apariencias y texturas. En primer lugar, se utilizó una mezcla de agua con cal, lo que le da un aspecto más blanquecino al material. En segundo lugar, se utilizó el aceite de linaza, aplicando varias capas. En tercer lugar, se aplicó una resina de soja y NaOH, la cual se utiliza sobre los textiles de micelio, ofreciendo una mayor elasticidad y una textura suave. Finalmente, se determina que el recubrimiento debe ser de aceite de linaza con un revestimiento de cal, ya que el aceite lo protege frente a la humedad, mientras que la cal le da un mejor acabado y evita otros hongos en su superficie²⁷.

Se considera que de modo que el componente se encuentre verdaderamente protegido, es necesaria una capa de impermeabilidad de origen plástico. Este sellado puede permitir no sólo la protección del componente frente a la intemperie, sino que también ofrece la resistencia necesaria como forma de posible conexión con otros elementos. El contacto directo de un material de este tipo con otros elementos estructurales y su exposición a agentes externos (lluvia, tierra, humedad) se debe evitar a toda costa, para lo cual es necesario aplicar una barrera de protección. En la industria de la construcción podemos encontrar una infinidad de productos de este tipo, tanto en formato líquido, textil y laminado. Para este caso, y de modo que no interfiera con la biodegradabilidad del material de micelio, la protección del componente se desarrollará en partes.

23 Lelivelt, R., Lindner, G., Teuffel, P., Lamers, H., & SD, U. S. D. (2015). The mechanical possibilities of mycelium materials. Eindhoven university of technology (TU/e).

24 Elsacker, E., Vandeloock, 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, 138431.

25 Souza, Eduardo. "Barnices, Aceites, Ceras: ¿Cuáles son los acabados más adecuados para la madera?" [Vernizes, Stains, Óleos, Ceras: Quais são os acabamentos mais adequados para madeira?] 29 feb 2020. Plataforma Arquitectura.

26 Rodríguez, S., & De Pablo, C. (2020, June 19). Guía Micotextil - Textiles de Hongos y Equipo Científico de Libre Acceso. Retrieved from osf.io/pfqne

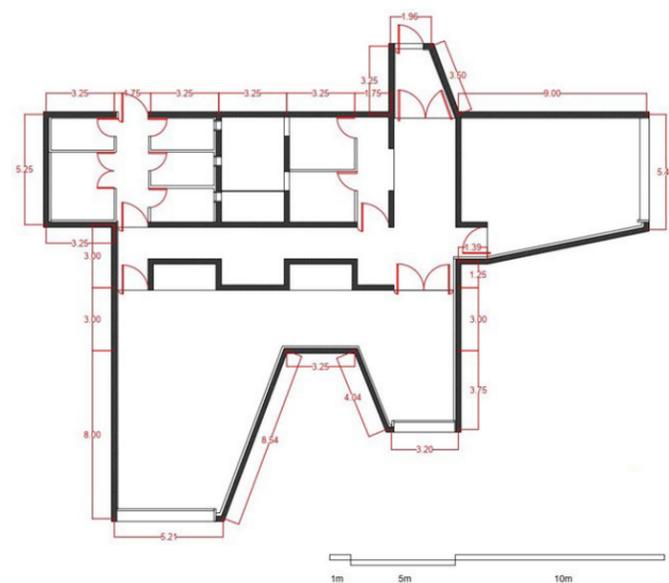
27 Ver Anexo.



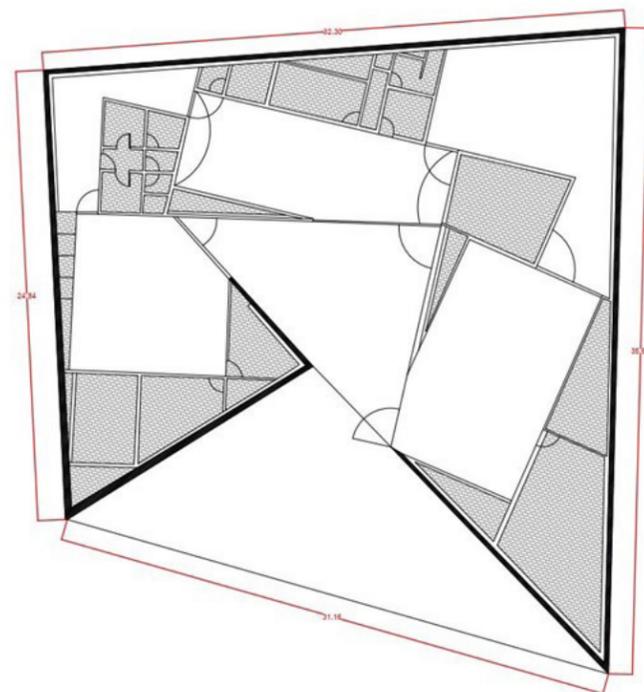
28.

IV. VARIABLES RELEVANTES

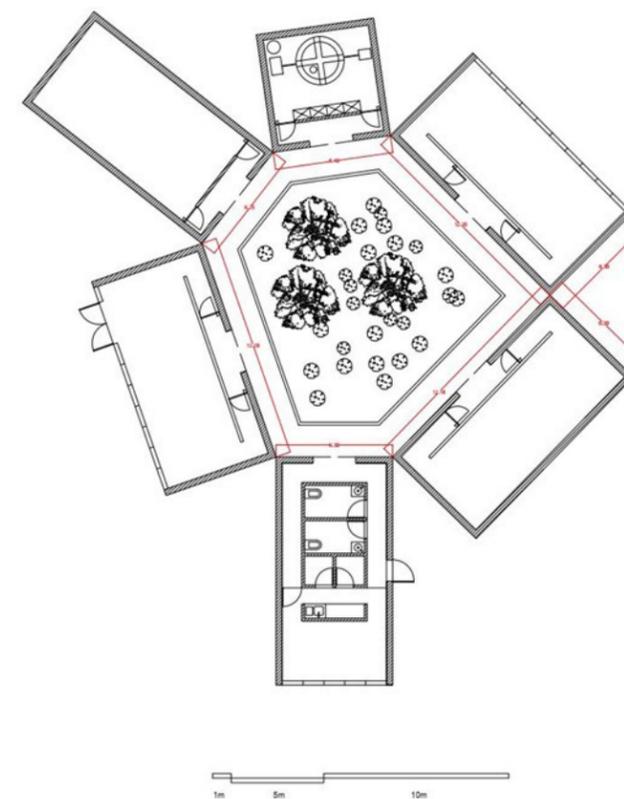
En este capítulo se establecen las consideraciones de ubicación y uso de componente de micelio, el cual será integrado en la cubierta de un centro de interpretación ubicado en el sur de Chile. Se observan las actividades y servicios que ofrece un centro de este tipo, junto con las características que presenta el Parque Omora, lugar donde se proyecta el centro.



29.



30.



31.

Fig 29. Planimetría Centro de Interpretación Los Calares del Mundo. Elaboración propia.

Fig 30. Planimetría Centro de Interpretación Lagoa de Furnas. Elaboración propia.

Fig 31. Planimetría Centro de Interpretación del Desierto de Atacama. Elaboración propia.

Como se ha mencionado antes, el componente de micelio para cubierta será utilizado en la envolvente arquitectónica de un centro de interpretación del paisaje. A continuación, se realizó un estudio de Centros de Interpretación ubicados a lo largo de todo el mundo. Este estudio contempla el programa y la estructura, poniendo énfasis en las actividades y servicios que ofrece cada uno. Se redibujaron inicialmente las plantas de varios centros para comprender su configuración espacial y recorridos.

El primer caso corresponde al Centro de Interpretación del Parque Nacional los Caladres del Mundo, ubicado en España. Construido en 2009, por el arquitecto Manuel Fonseca Gallego, este centro cuenta con una superficie de 355,85m². El programa incorpora dos piezas fundamentales; la Sala de Interpretación y la Sala de Proyecciones y reuniones. Esta última debe servir al mismo tiempo para las proyecciones sobre el Parque Natural y como Sala de Reuniones para el Patronato de este, pudiendo cambiar de uso con la sola modificación del mobiliario susceptible de distintos

agrupamientos. Se acompañan estas dependencias con una zona de acceso, vestíbulo, zona de recepción y administración con dos despachos, zona de servicios con aseos, almacén, cuarto de instalaciones y zona de tránsito entre la parte privada y la pública.

El segundo caso es un Centro de Control e Interpretación en el Parque Lagoa das Furnas, en Portugal. Se construyó el año 2008 por la oficina Aires Mateus y cuenta con un área de 1130m². El proyecto tiene como intención evocar el paisaje arquitectónico de Las Azores, basándose en la forma y los materiales que integran la memoria colectiva de esta isla y el archipiélago. Es por esto que la expresión arquitectónica se define con volúmenes arquetípicos, simples y compactos, revestidos con piedra local. Existen dos edificios, uno de ellos corresponde a un alojamiento temporal para científicos, mientras que el otro es un centro de control e interpretación con espacios flexibles. El primero es un volumen compacto de 4 aguas dividida en cuatro unidades, cada una con baño, cocina y espacio de almacenamiento. En el caso del centro, este es

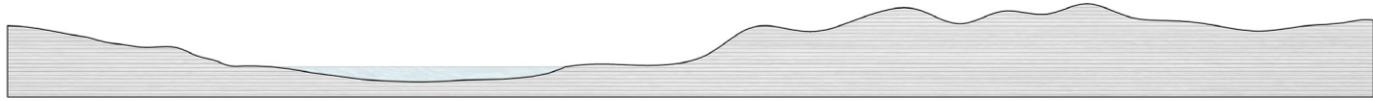
un volumen con un patio interior, desde donde se revelan compartimentos que crean espacios intermedios entre el interior y el exterior.

El tercer caso corresponde al Centro de Interpretación del Desierto, ubicado en Atacama, Chile. Se construyó en el año 2015 por los arquitectos Emilio Marín y Juan Carlos López y tiene una superficie de 452m². Sus autores sostienen que el proyecto pretende extender los límites de la arquitectura moderna y abrirse al paisaje. El proyecto articula dimensiones de la arquitectura con el territorio, integrando la dimensión geográfica, ecológica y paisajística. El centro cuenta con un patio interior al aire libre que se asemeja a un oasis y está rodeado de 4 salas de exposición, algunas con vistas al paisaje, una sala con baños y una bodega.

Los 3 casos anteriores describen centros con espacios flexibles, cuya forma se adapta al contexto directo, asumiendo usos y programas en relación con el lugar y sus funciones. En el primero, se destaca una zona privada y una zona pública, y entre éstas

una circulación con lucarnas. En el segundo caso, se observa un espacio de mayor flexibilidad, los espacios se recorren y comprenden la circulación en su totalidad. El espacio público se corresponde con las circulaciones. En el tercer caso se destaca la estrecha relación entre el centro y el paisaje del lugar y la idea de un espacio amplio abierto que conecte todas las salas.

Es importante destacar, que se investigaron y dibujaron varios centros de interpretación a lo largo del mundo, sin embargo, se muestran aquellos que tienen mayor relevancia y relación con lo que se desea diseñar en el proyecto. En este caso, esto corresponde a lucarnas ubicadas en los espacios públicos, su correspondencia con la circulación, y la existencia de un espacio central que conecta vistas y recorridos presentes en el lugar. Considerando que la mayor parte de los centros contemplan una estrecha relación con el paisaje que los rodea, es fundamental ahondar en las características del lugar.



CORTE A



CORTE B

32.

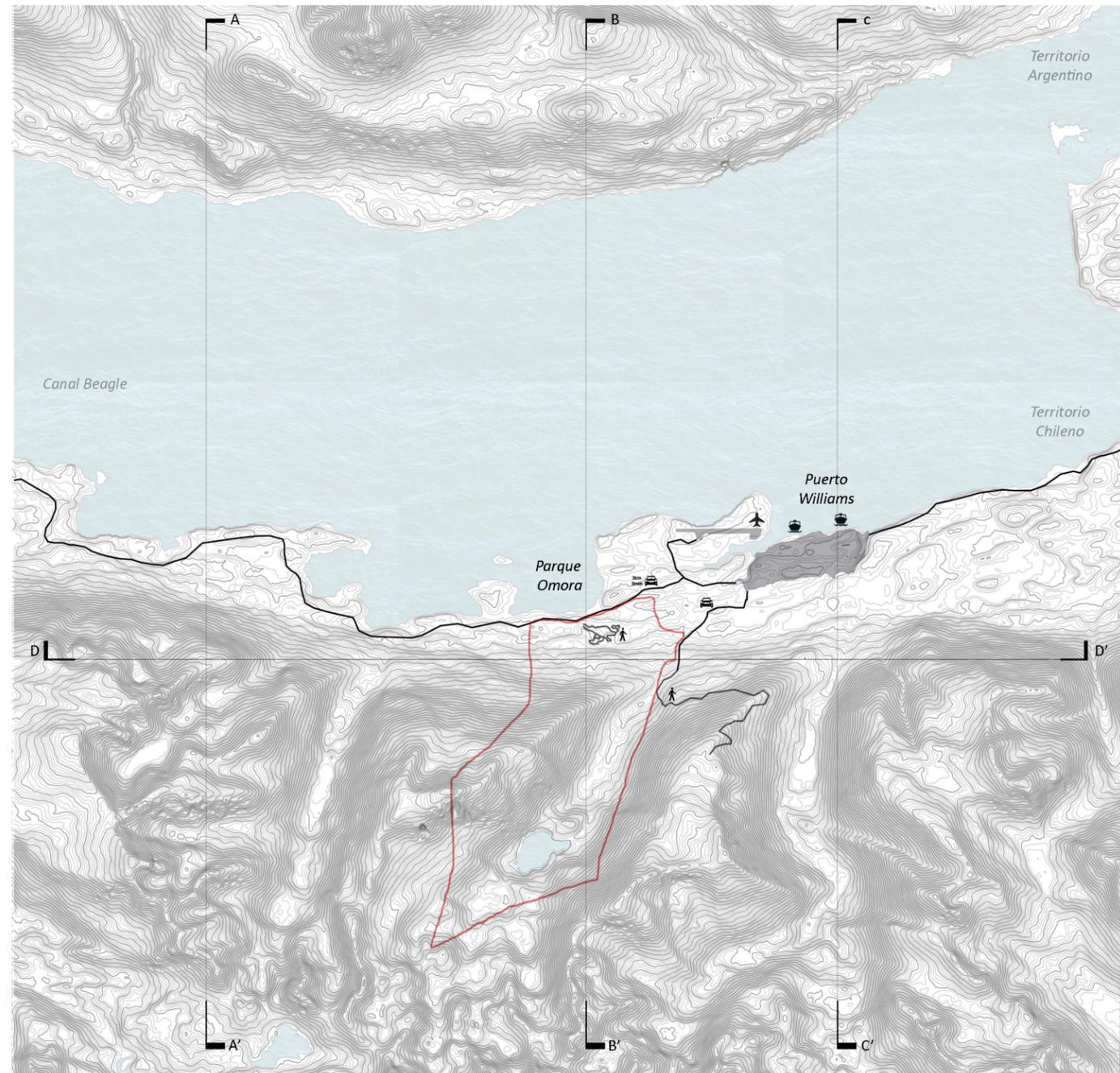


CORTE C



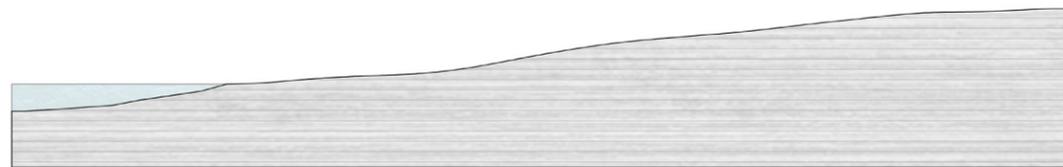
CORTE D

34.

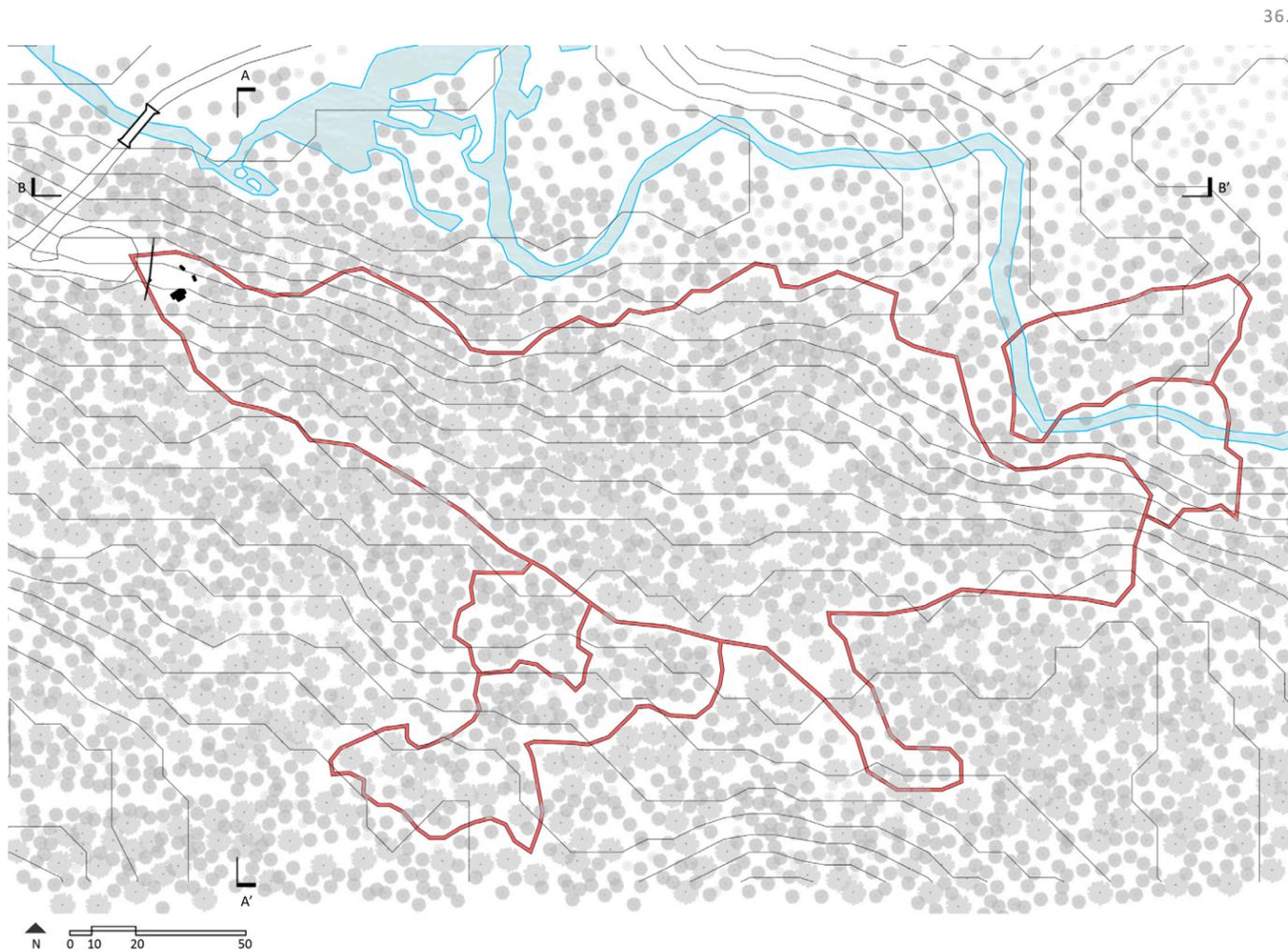




CORTE A



CORTE B



36.

37.

Fig 32. Cortes a escala geográfica entre la costa Argentina, contemplando el canal Beagle y la costa norte de la Isla Navarino, señalados en el plano de la Figura X. Elaboración propia.

Fig 33. Plano a escala geográfica del sur de Chile con la ubicación del lugar de proyecto en rojo, ubicado en norte de la Isla Navarino. Elaboración propia.

Fig 34. Cortes a escala geográfica que atraviesan Puerto Williams y el Parque Omora al norte de la Isla Navarino, señalados en el plano de la Figura 35. Elaboración propia.

Fig 35. Plano a escala geográfica del norte de la isla Navarino, con el perímetro de Parque Omora destacado en rojo, destacando los accesos al parque y sus senderos. Elaboración propia.

Fig 36. Cortes a escala de proyecto del norte del Parque Omora, trazados a la altura del acceso al parque. Elaboración propia.

Fig 37. Plano a escala de proyecto del norte del Parque Omora, con los destacados en rojo y los cortes señalados a la altura del acceso del parque. Elaboración propia.

CONTEXTO DEL LUGAR

El lugar del proyecto corresponde al Parque Etnobotánico Omora. Este parque tiene un área de 1.069,74 hectáreas y está conformado por la suma de concesiones gratuitas otorgadas a dos instituciones chilenas sin fines de lucro: la Universidad de Magallanes (663,83 ha), y la Fundación Omora (405,91 ha). El Parque Omora se ubica a 3 km al oeste de la ciudad de Puerto Williams, en la costa norte de la isla Navarino, en el sector denominado caleta Róbaló. En la isla navarino se observan múltiples rutas de trekking, destacándose los Dientes de la isla.

El parque etnobotánico Omora cuenta con un ecosistema principal de bosque templado subantártico, que constituye el bosque más austral del planeta. Debido a esto, el programa principal del parque se encuentra destinado a la investigación.

Las principales actividades y estudios del parque son:

- Monitoreo de aves subantárticas, programa de investigación que se encuentra en desarrollo desde el año 2000, teniendo como objetivo monitorear y estudiar los aspectos de la ecología general de las aves de este sitio. Estos monitoreos permiten estudiar los efectos del cambio climático y de las especies invasoras.

- Invertebrados de río, programa de investigación enfocado al estudio de la ecología y fisiología de los invertebrados de agua dulce, teniendo como objetivo contribuir a la conservación de los ecosistemas de agua dulce, ya que estos organismos son fundamentales para mantener la calidad del agua.

- Ecoturismo con lupa, programa creado en el año 2002, que tiene como objetivo ser un turismo sustentable y ético, poniendo atención a los seres vivos pequeños que generalmente pasan inadvertidos. Existen circuitos en el parque diseñados especialmente para este tipo de turismo.

Este lugar cuenta con 3 recorridos:

- Circuito de los Bosques en Miniatura del Cabo de Hornos en el Parque Etnobotánico Omora
- Habitantes Sumergidos en los Ríos del Cabo de Hornos
- Los bosques más australes del planeta

GEOGRAFÍA

A partir de un programa de georeferencia llamado Qgis, se trazaron curvas de nivel y cortes del Parque Omora y su contexto inmediato. Como se observa en las secciones, se destaca un gran desnivel geográfico de norte a sur, mientras que en el sentido oriente-poniente, se observa un valle donde está ubicado el parque Omora.

Para acceder al parque desde Puerto Williams, se debe cruzar el puente Róbaló y a pocos metros, al lado izquierdo se llega al estacionamiento del parque. Como preexistencias encontramos los senderos y una caseta de guardia. Hay infraestructura de madera y metal diseñada por el ingeniero Andrés Stambuk a lo largo de los senderos, lo que permite cruzar el río en el recorrido "Habitantes Sumergidos".

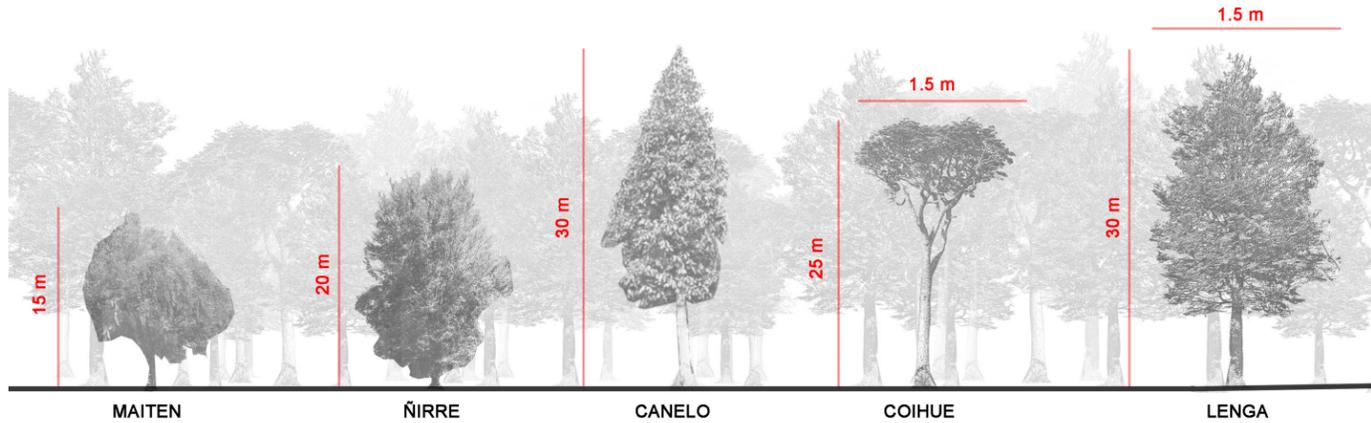
En el circuito de senderos se distingue un sendero central, del cual se desprenden otro dos, con un total de casi 3 kilómetros de largo. En la región podemos encontrar 5 tipos de árboles (Figura 40), de los cuáles se destaca el maitén, especie nativa de Chile y representante del bosque esclerófilo del sur del continente. El parque y sus senderos se encuentran en un valle de la isla, próximo a la Caleta Róbaló, como se observa en las secciones. Es importante mencionar que la vegetación se encuentra en su mayoría hasta 100 m.s.n.m., mientras que a mayor altitud, la vegetación disminuye y con ello su altura.



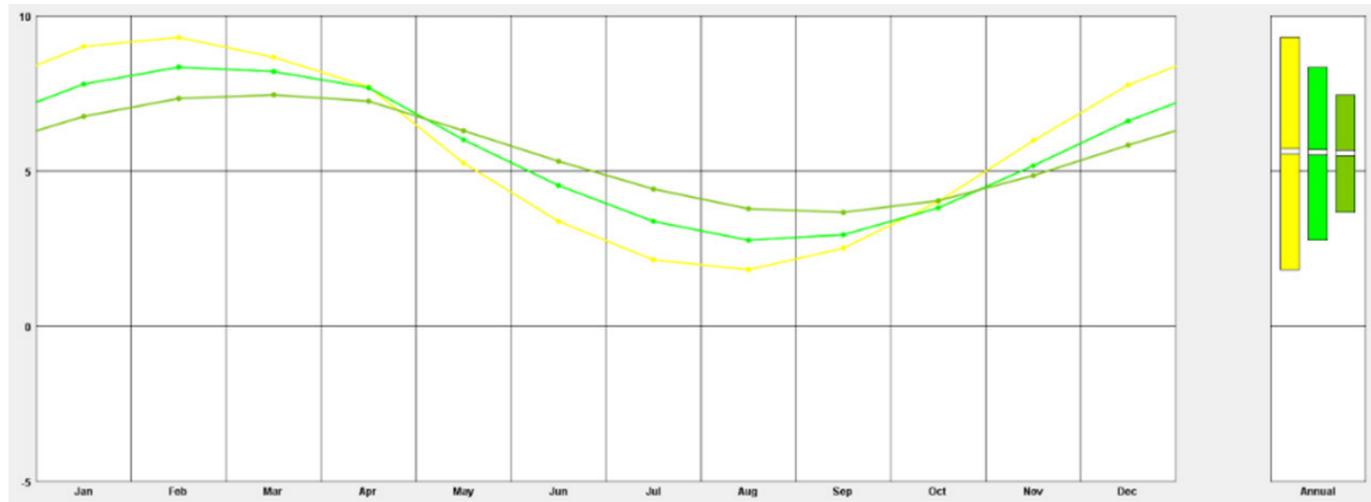
38.



39.



40.



41.

Datos Climáticos 1961-1990	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura Máxima Media	13,6	13,8	12,4	.	6,5	.	.	5,6	7,8	10,0	11,7	13,1
Temperatura Media	9,5	9,7	8,3	.	3,7	.	.	2,7	4,4	6,2	7,6	8,9
Temperatura Mínima Media	5,4	5,6	4,3	.	0,8	-0,3	.	-0,3	0,9	2,3	3,5	4,7
Dirección de los Vientos	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
Intensidad Media de los Vientos	11	10	10	10	9	10	9	10	11	11	11	11

CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR

La ubicación geográfica y el clima del lugar son de gran relevancia para el proyecto debido a las condiciones térmicas extremas que ofrece. Para el análisis climático del Parque Omora, se utilizaron los datos de la estación meteorológica de Puerto Williams (G.M.A. Zañartu) que se encuentra aproximadamente a 3 km al este. Con los datos climáticos se desarrollaron gráficos a través de la plataforma Climate Consultant, donde se observan las temperaturas medias máximas y mínimas, dirección de los vientos y temperaturas bajo suelo.

TEMPERATURA

La isla Navarino, donde se encuentra el Parque Omora, se encuentra en la zona extremo sur, de acuerdo con la zonificación climático-habitacional de la NCh1079-2008. Según la clasificación climática de Köppen, el parque es de clima polar, lo cual representa un 12,8% del área terrestre. En las zonas con clima polar tundra (ET), la oscilación térmica anual es escasa y la temperatura media anual es de 5,5°C.

Se destacan las bajas temperaturas entre mayo y septiembre, mientras que febrero es el mes más cálido con una máxima de 13,3°C. Según la tabla adjunta (Figura 42), las temperaturas medias mínimas alcanzan hasta los -0,9°C, mientras que la temperatura media anual no excede los 10°C.

TEMPERATURA DE SUELO

La temperatura del suelo es relevante, ya que no tiene temperaturas inferiores a los 0°C y tiene menores oscilaciones que las temperaturas del aire exterior. Se observa en el gráfico, las tem-

peraturas bajo 4 metros de profundidad se mantienen constantes y cercanas a los 5°C, mientras que para 0.5m de profundidad representa mayores temperaturas en verano, pero inferiores en invierno (Figura 41).

La ubicación geográfica y el clima del lugar son de gran relevancia para el proyecto debido a las condiciones térmicas extremas que ofrece. Considerando que dentro del mismo proyecto se realizará el cultivo y crecimiento del material de micelio, es fundamental proponer un sistema de almacenamiento con condiciones ideales que permitan el desarrollo del material. El material crece en ambientes cálidos, idealmente sobre los 20°C y bajos los 30°C mientras el micelio coloniza el sustrato. Estas condiciones son inexistentes en una zona polar de las características presentadas, por lo que se propone que el material crezca bajo tierra. Esto permitiría, al menos, condiciones térmicas estables, y dependiendo de la profundidad, temperaturas más cálidas.

Fig 38. Imagen desde el cerro Bandera hacia Puerto Williams. Autor: Gerrit Burrow, desde Google Earth.

Fig 39. Imagen desde los picos de Navarino hacia el canal Beagle. Autor: Isabelle Lamorlette, desde Google Earth.

Fig 40. Elevación de la posible vegetación en el Parque Omora. Elaboración propia.

Fig 41. Gráfico de oscilación térmica bajo suelo obtenido a través de la plataforma Climate Consultant. Elaboración propia.

Fig 42. Tabla de datos climáticos obtenidos de G.M.A. Zañartu. Adaptado por Sofía Orellana.



43.

VI. ARGUMENTO PROYECTUAL

A partir de las consideraciones planteadas, se concibe una aproximación proyectual que contempla un sistema de suelos y un sistema de cubiertas, donde va ubicado el componente a base de micelio, cuya configuración autónoma le permite ser parte del recorrido del parque.

Fig 43. Collage proyectual, desarrollado a partir de imágenes del contexto del Parque Omora y el proyecto Cementerio de Igualada de Enric Miralles. Elaboración propia.

OBSERVACIONES

El Parque Omora cuenta con 5 funciones principales, y una de ellas es la implementación de una reserva natural y centro de investigación, educación y conservación biocultural de la Reserva de Biosfera Cabo de Hornos. En el contexto austral del parque, se observan varios senderos que lo recorren, rodeados de flora y fauna nativa de alto interés científico, por lo que el diseño de un centro de interpretación debe contemplar instalaciones que permitan la preservación ambiental de los bosques y un espacio amplio y flexible para la educación medio-ambiental para los visitantes, tanto científicos como turistas.

Respetando el lugar, se espera que la construcción tenga el menor impacto ambiental posible. Para ello es fundamental la expresión del material del componente y la forma en la cual se conecta con su entorno natural. Considerando la ubicación y la accesibilidad al parque, también es importante que la construcción contemple una logística racional y eficiente de la estructura y el componente a utilizar, considerando especialmente las limitaciones que este pueda tener.

Se contempla, además, un laboratorio dentro del cual se pueda desarrollar el componente que será

parte de la cubierta del centro de interpretación. El laboratorio comprende un espacio donde pueda crecer el biomaterial bajo condiciones óptimas. La parte vegetativa del hongo crece bajo tierra, en condiciones de humedad y plena oscuridad, como las raíces de un árbol, por lo que el ambiente del subsuelo parece el ideal para ubicar el laboratorio.

ESTRATEGIAS GENERALES

Luego de analizar las características presentes en el lugar y las actividades que implica el programa de un centro de interpretación, se considera imprescindible contar con un espacio amplio y flexible, con servicios básicos como baños y bodegas. Al mismo tiempo, se propone un espacio pensado para el almacenamiento del material a base de micelio, el cual se encontrará insertado en los muros, bajo tierra. Se dispondrá de un espacio central amplio y flexible, el cual permita adaptarse al visitante y su interés, dejando espacios aptos para presentaciones, actividades grupales y de esparcimiento. El programa mencionado irá inserto en un sistema de recorridos que se adapte a las preexistencias del parque, como lo son sus senderos y accesos. Para llevar a cabo la proyección de este centro de interpretación se consideran las siguientes operaciones:

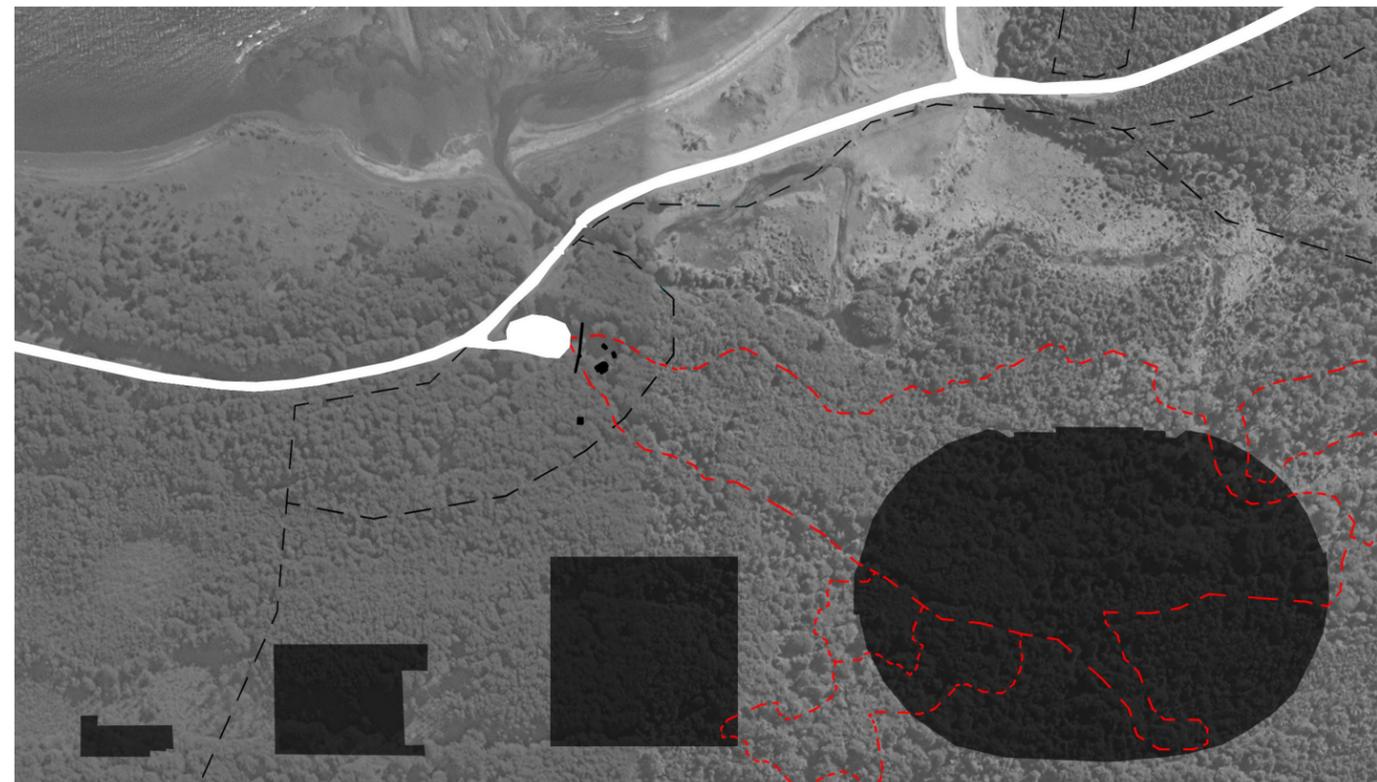
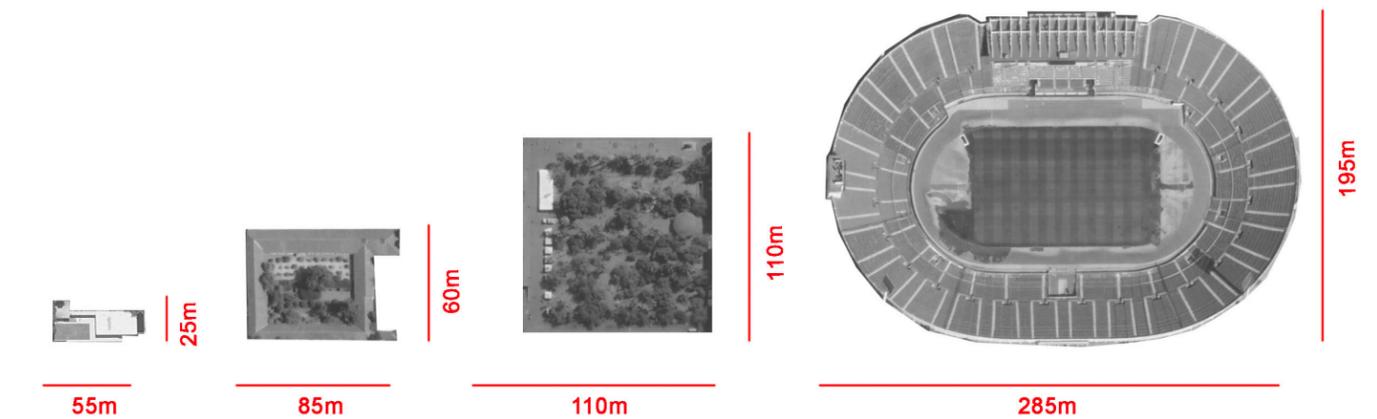
Fig 44. Plano de la zona norte del Parque Omora y sus senderos en línea roja punteada. En negro se encuentran los tamaños correspondientes a áreas conocidas como el pabellón de Mies van de Rohe, la casaca de Lo Contador, la plaza de Armas y el Estadio Nacional. El objetivo de este ejercicio fue el de comparar las superficies para generar una idea del tamaño de este sector del parque.

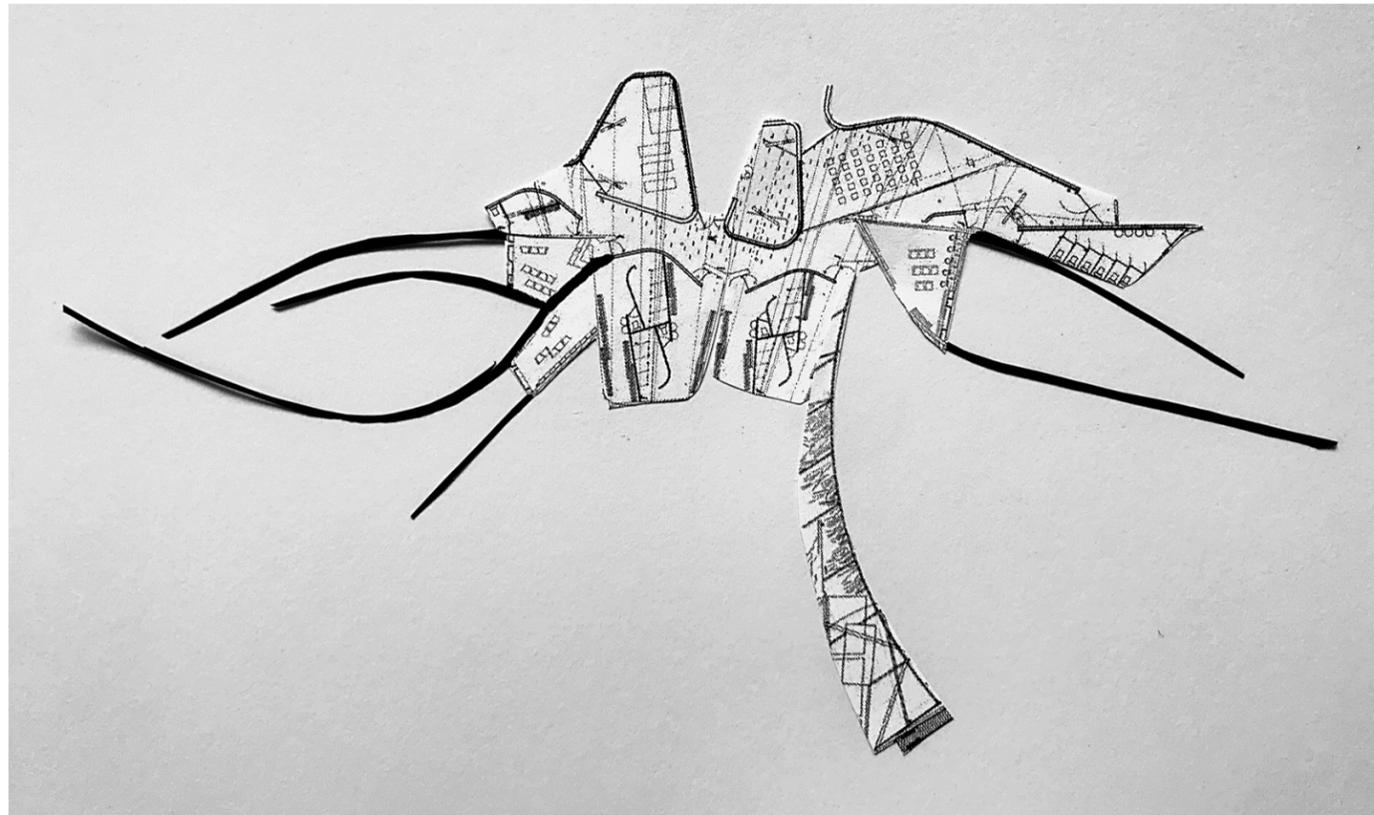
Fig 45. Corte de simulación donde se ubican las estrategias de sistema de suelos y sistema de cubiertas. Elaboración propia.

1. Se proyecta un sistema de suelos: El centro de interpretación contemplará un juego de recorridos y niveles, donde se define un estrato superior correspondiente al bosque subantártico y un estrato inferior donde se ubica el centro y el laboratorio donde se desarrollará el componente de micelio.

2. Se proyecta un sistema de cubiertas: Desarrolladas a partir del componente de micelio, destacando su característica resistente y otorgando a la cubierta un carácter autónomo y ligero, separada del suelo.

Con un impacto ambiental mínimo, se pretende diseñar una estructura simple, ya que la experimentación y manufactura de este biomaterial ofrece oportunidades de nuevas formas y desafíos estructurales, lo cual se presenta como un atractivo para el parque y se complementa con sus objetivos educativos de conservación y preservación natural.



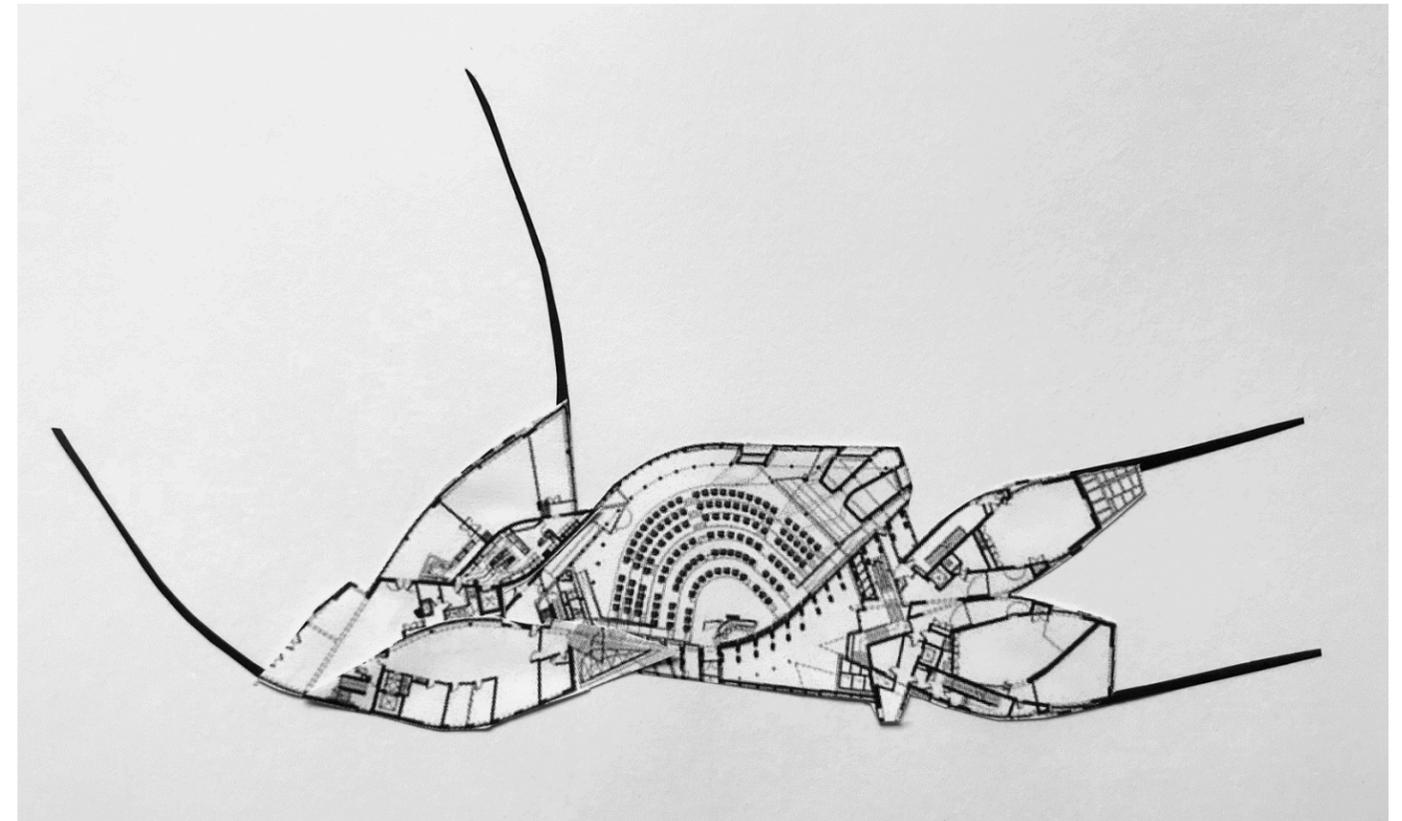


46.

REFERENCIAS Y EXPLORACIÓN

Para la definición de una planta y un recorrido se estudió el trabajo y los fotomontajes del arquitecto Enric Miralles. Se revisaron sus croquis, collages y proyectos construidos, con énfasis en los juegos de nivel y la manera en que sus proyectos encuentran armonía con la forma orgánica. Inspirado en el cementerio de Igualada, se propone un sistema de almacenamiento de micelio análogo a los nichos de un cementerio. Esto es, embebidos en la tierra y tomando las condiciones térmicas y de oscuridad que ofrece el subsuelo. Se establece entonces un recorrido del centro “bajo tierra”, definiendo una especie de interior amurallado, mientras que el parque en el estrato superior mantiene sus árboles y especies sobre la superficie.

A partir de los proyectos de Enric Miralles, destacando los sistemas de recorrido, los movimientos de tierra y su forma, se exploraron diferentes configuraciones espaciales para darle forma al proyecto (Figuras 46 y 47). Considerando un programa que cuenta con un acceso descendente hacia un gran espacio amplio y flexible con el laboratorio bajo la tierra y salidas hacia los senderos preexistentes del parque, se proyecta en planta con fragmentos de proyectos de Miralles.



47.

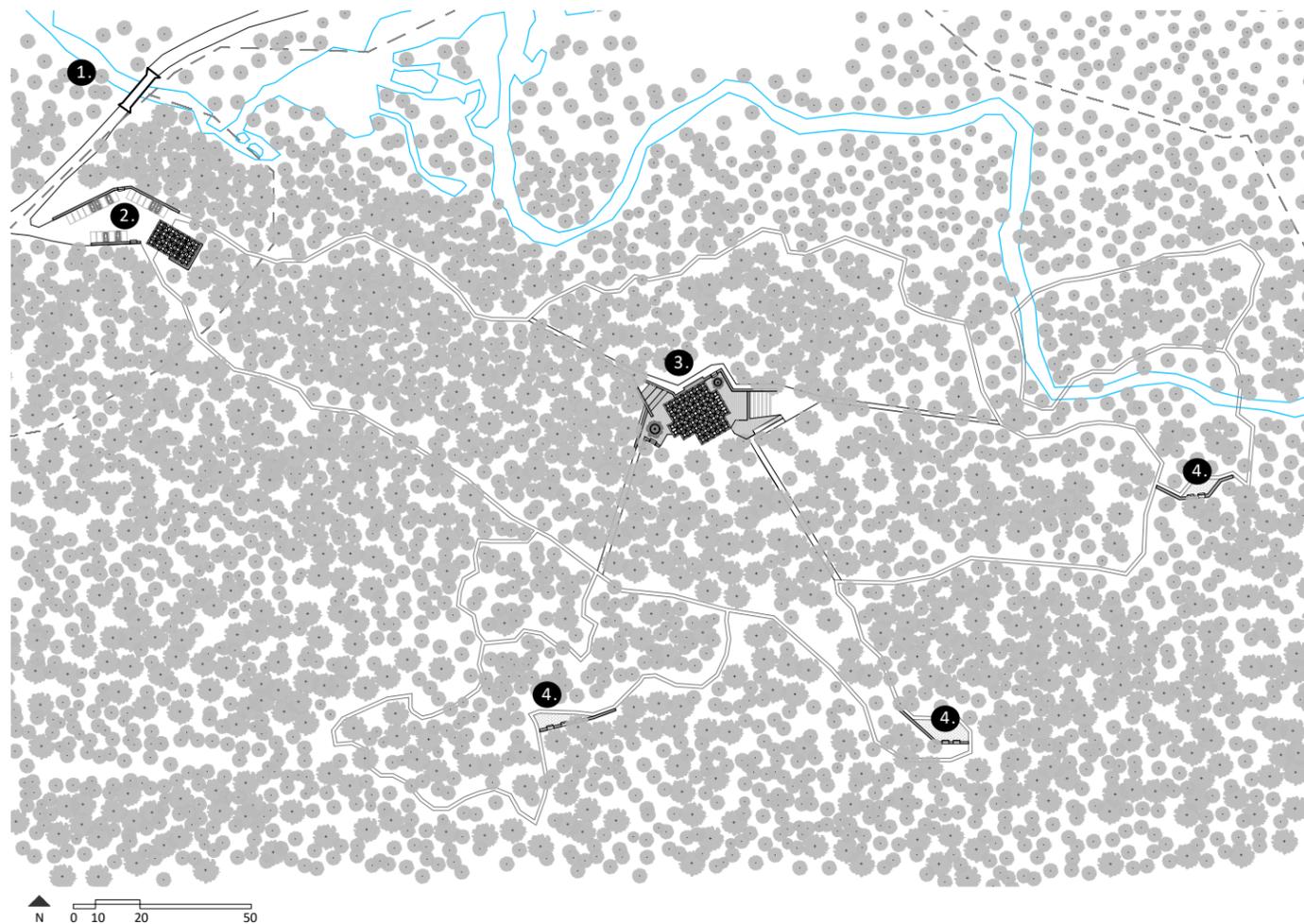
MOVIMIENTOS DE TIERRA

Como se menciona en las características del lugar, las temperaturas del suelo son las más favorables para el crecimiento del micelio, por su baja oscilación térmica. Ya que el programa incluye un laboratorio, se propone ubicar el centro bajo el suelo, utilizando la tierra como masa térmica. Se entiende que el centro de interpretación se posa sobre un parque natural, por lo que las excavaciones se deben contemplar en un marco de respeto sobre el contexto histórico natural. Es por esto que se propone el uso de gaviones y tierra reforzada para las contenciones. Este muro de tierra armada se encuentra constituido por suelo granular compactado, donde se colocan mallas de refuerzo y gaviones de revestimiento, y contempla un sistema de dre-

naje interno. La presencia de mallas al interior se debe a las fuerzas de tensión que transmite el suelo. La presencia de estos muros no sólo se da en el centro, sino también en el acceso a los estacionamientos y en estaciones dentro de los senderos que contemplan una gran inclinación del terreno.

Fig 46. Exploración proyectual 1, desarrollada a partir de un collage manual con piezas en planta de proyectos de Enric Miralles. Elaboración propia.

Fig 47. Exploración proyectual 2, desarrollada a partir de un collage manual con piezas en planta de proyectos de Enric Miralles. Elaboración propia.



48.

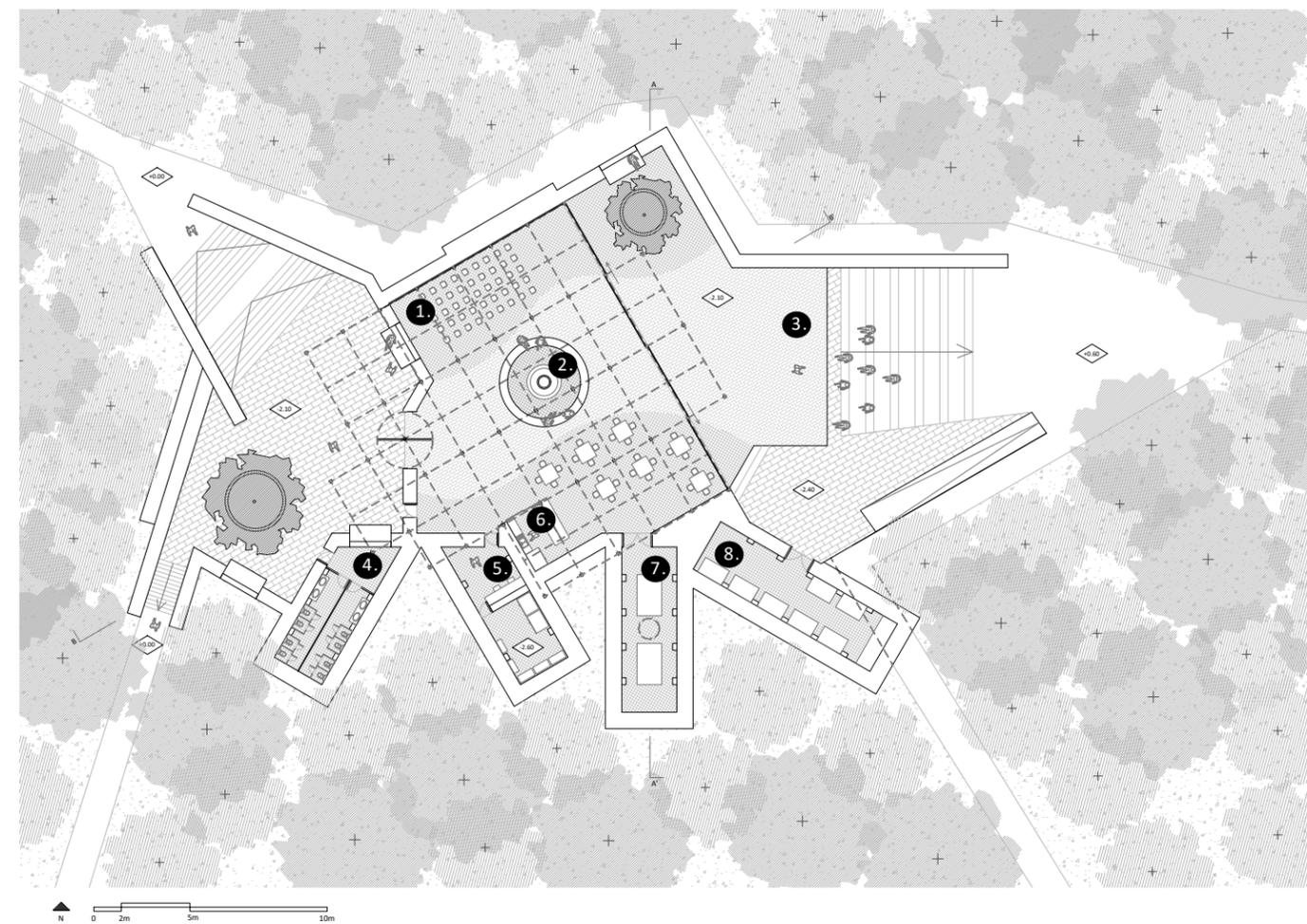
RECORRIDO

Se establece un recorrido personal y experimental, que permita al visitante establecer una relación con el material de micelio y el parque. La relación con el bosque se da a partir del juego de niveles, que explota la curiosidad del visitante, presentando múltiples puntos de vista por los cuales aproximarse al bosque subantártico. La relación con el componente a base de micelio no es solo visual, pues el material está hecho para proteger e iluminar los espacios destinados a la exposición y educación medioambiental del parque.

En el ingreso ya se vislumbra el componente en la envolvente que cubre la caseta de recepción, lugar donde se almacenan las lupas que forman parte del circuito de "ecoturismo con lupa" que presenta el parque. Ya con los implementos necesarios para una mirada al mundo miniatura, los visitantes se sumergen en el bosque a través de los senderos establecidos.

A 200 metros de la entrada, los senderos culminan en un bajo nivel flanqueado por contenciones de tierra, un claro dentro del bosque por el cual se accede a un espacio interior. Este espacio se encuentra cubierto por el componente de micelio, que ofrece un amplio espectro de luces gracias a las lucarnas orientadas en la cubierta. En este espacio se accede al laboratorio, donde crece el componente destinado a cubrir la envolvente arquitectónica.

Al momento de salir del centro techado, el visitante se encontrará con un anfiteatro al aire libre para presentaciones y actividades, el cual asciende hasta la superficie natural del bosque. Alcanzada esta altura, el espacio se ramifica en los senderos destinados al río y al recorrido de "Los bosques más australes del planeta", donde el visitante tendrá la libertad de recorrerlo a gusto.



49.

MEMORIA

En el contexto austral de conservación y preservación de los bosques subantárticos, se plantea desarrollar un proyecto de arquitectura, el cual respete el contexto histórico y natural donde se posa. Contemplando las limitaciones del lugar y del material a trabajar, se presenta una oportunidad para crear un espacio flexible y adaptativo, con una expresión arquitectónica que permita dar cuenta del valor del lugar y la singularidad del material. Con un impacto ambiental mínimo, se pretende diseñar una estructura a partir de compuestos a base de micelio de hongo. La experimentación y manufactura de este biomaterial ofrece oportunidades de nuevas formas y desafíos estructurales, lo cual se presenta como un atractivo para el parque y se complementa con sus objetivos educativos de conservación y preservación natural.

Para ello es fundamental que la expresión del material y su forma se conecten con su contexto

natural. Considerando la ubicación y la accesibilidad del parque, es importante que la construcción contemple una logística racional y eficiente de la estructura y el material de micelio, por lo que el desarrollo del material se hará in-situ, en los laboratorios proyectados en el subsuelo.

Descripción de las Figuras:

Fig 48. Plano a escala de proyecto del norte del Parque Omora con las cubiertas proyectadas. Luego del puente Róbalo(1) se observa el acceso al parque(2), donde se distingue la caseta de guardias, una pérgola, y el centro de interpretación entre los senderos(3). Se encuentran además estaciones de descanso entre los senderos (4), con muros de gaviones y tierra reforzada. Elaboración propia.

Fig 49. Planta del centro de interpretación del Parque Omora, con sus accesos desde diferentes senderos del parque. El centro cuenta con baños(4), el laboratorio con una sala estéril(5), una pequeña cocina(6), una sala de cultivo(7), y una bodega de acceso exterior para almacenar el material(8). Al centro se observa una chimenea que mantiene el interior cálido(2), mientras que por el lado norte hay un pequeño auditorio (1). Por el lado este, nos encontramos con un anfiteatro que aprovecha los movimientos de tierra, y un patio de luz al norte (9). Elaboración propia.



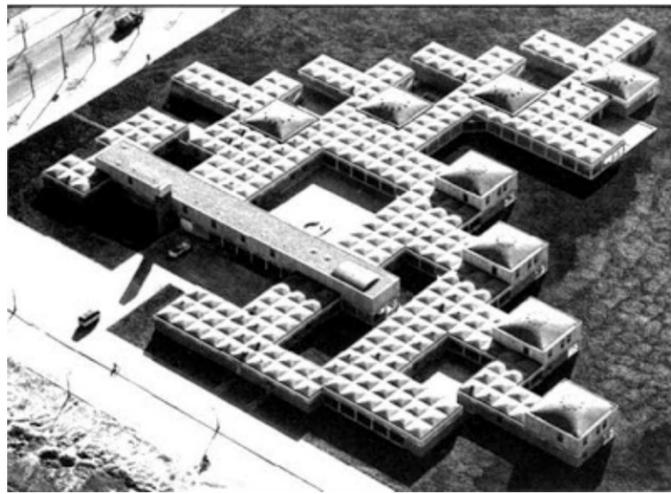
50.

VI. COMPONENTE CONSTRUCTIVO

Para el desarrollo del componente constructivo se definen las prestaciones del elemento, se observan componentes modulares de cubierta y se establece su aplicación en la envolvente arquitectónica ubicada en el sur de Chile.

REQUERIMIENTOS

Es importante mencionar que el componente, dado a su ubicación en una cubierta, debe tener, en primer lugar, un carácter impermeable y hermético, protegiendo el material de micelio de los agentes ambientales del lugar. En segundo lugar, se contempla la posibilidad de que, debido a las grandes precipitaciones, su formato permita conducir el agua y evitar acumulaciones de aguas lluvia. En tercer lugar, y también con relación al ambiente natural, se considera relevante que el componente permita el ingreso de luz cenital al espacio interior. La condición lumínica, lógica de canalización y la condición impermeable, se consideran fundamentales al momento de diseñar el componente constructivo de la cubierta.



50.

REFERENCIAS

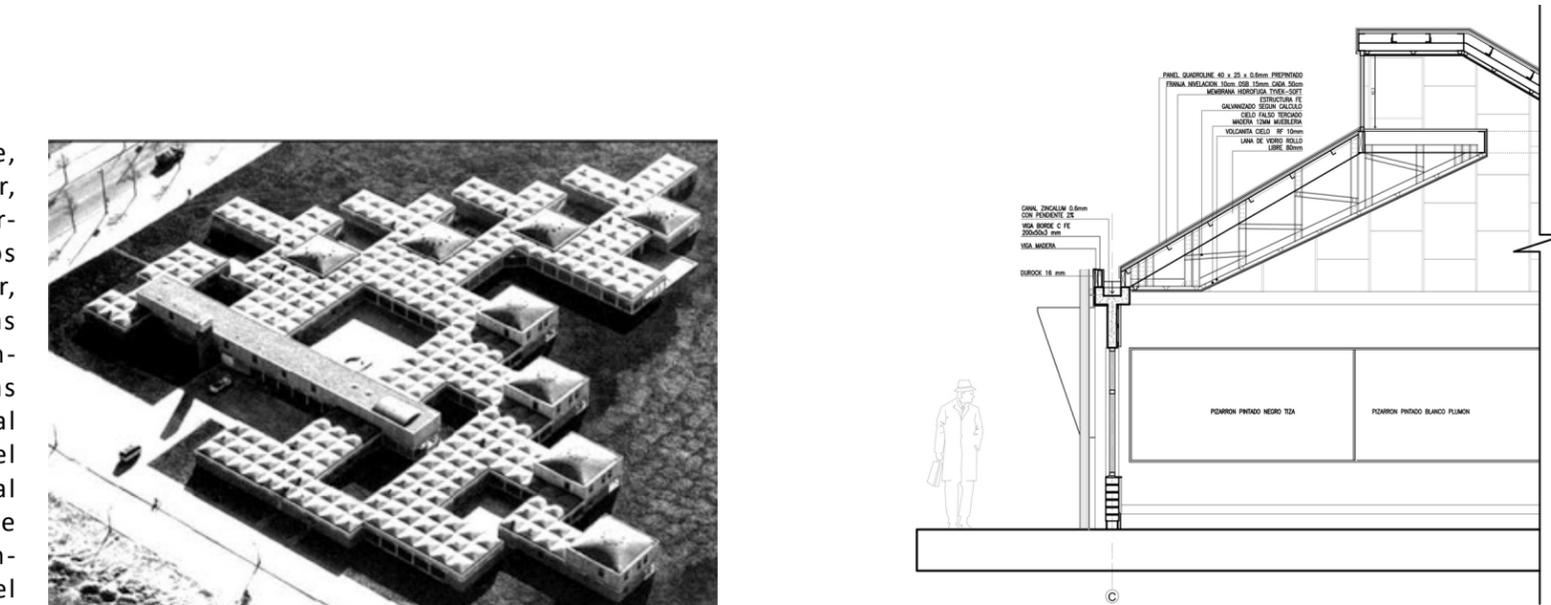
A partir de los requerimientos mencionados, se observan cubiertas modulares y sus componentes constructivos para generar una idea de la forma de cubrir el centro de interpretación, cuyo espacio se asemeja a una sala hipóstila con una grilla de pilares. Se considera además la presencia de lucernarios o ventanas cenitales que permitan la entrada de luz desde la misma cubierta.

En primer lugar, se estudia el orfanato de Ámsterdam de Aldo van Eyck, destacado por su extensión modular que se concentra en la planta de cubiertas. Un centenar de cúpulas piramidales de base cuadrada de 3,36m de lado marcan la pauta del proyecto. Éstas, prefabricadas en hormigón (e=100mm) y algunas con lucernario central, son soportadas por una retícula de las mismas dimensiones de pilares redondos y jácenas en "T" de hormigón in-situ²⁷. El proyecto presenta una trama de cubierta que no se corresponde del todo con el programa, que tiene recorridos diagonales que tensionan la trama ortogonal, por lo que la cubierta opera de forma autónoma.

27 Igor Fracalossi. "AD Classics: Amsterdam Orphanage / Aldo van Eyck" 21 Jan 2019. ArchDaily. Accessed 25 Sep 2021. <<https://www.archdaily.com/151566/ad-classics-amsterdam-orphanage-aldo-van-eyck>> ISSN 0719-8884

En segundo lugar, se revisa la remodelación de salas del Colegio Saint George, por Elton&Deeves, desde el año 2018. En este proyecto, se revalorizan las cubiertas de aulas de base de 9x9m, las cuales fueron reacondicionadas con nuevos estándares de control térmico y lumínico. Se descabezaron las lucarnas originales, ciegas y en desuso, y se alargaron dos de los planos de la cubierta generando una ventana al norte con una plataforma difusora para el ingreso de luz indirecta y ventilación. Como se observa en la Figura 51, la cubierta permite que la luz ingrese al recinto de forma indirecta a partir de un plano, mientras que los muros, de color blanco, reflejan la luz de manera suave hacia el interior.

De las referencias revisadas, se destaca la condición autónoma e independiente de la cubierta, por sobre el programa que ocurre en el interior del orfanato de Ámsterdam. El ingreso controlado de luz en las salas del Saint George, a partir de una plataforma y la posibilidad de ubicar ventanas cenitales abatibles nos indican las múltiples posibilidades de juego con los lucernarios y su orientación.



51.



52.

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN

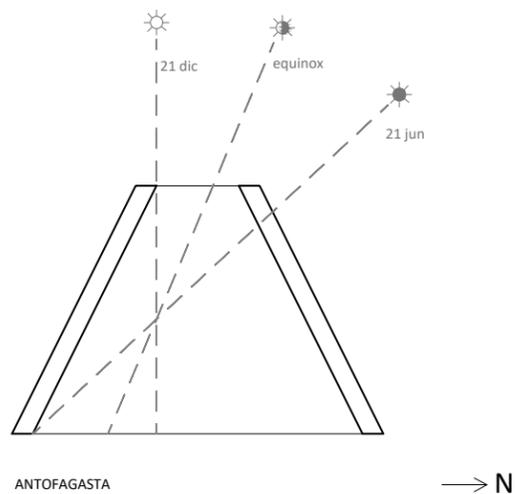
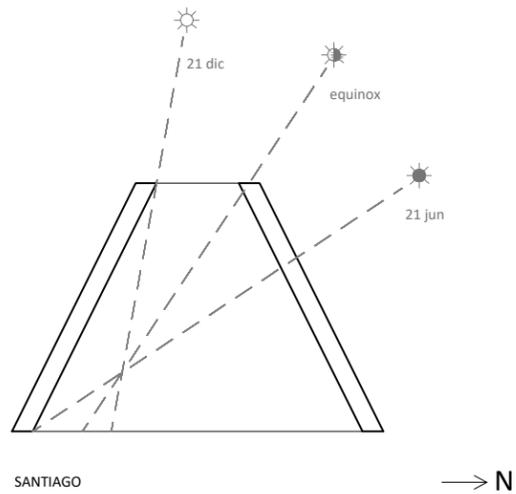
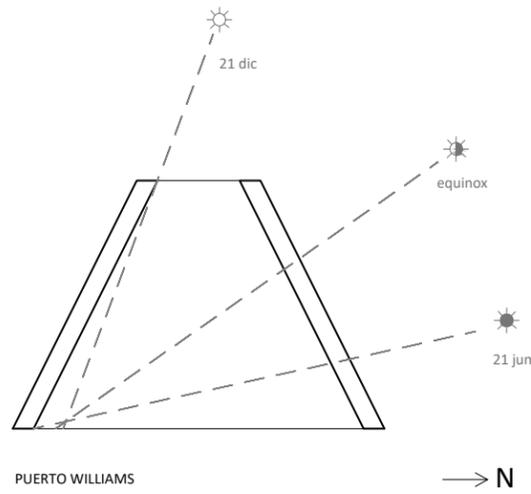
Una de las características del componente constructivo es su condición autónoma, que le permite replicarse y repetirse en una extensión modular de cubierta. Su condición modular, le permite además adaptarse a diversos programas, como un largo pasillo o una amplia sala hipóstila. El componente se comporta como una pieza terminada que se ubica sobre vigas, armando una cubierta de 3x3m, posada a su vez sobre pilares. Esta cubierta se presenta como un lucernario, con una abertura en la parte superior, la cual se encuentra orientada hacia uno de sus lados, por lo que se puede acomodar en torno al recorrido del sol, o incluso orientado hacia al sur si se desea luz indirecta. Acompañado de canaletas en sus bordes, donde el agua es conducida a las gárgolas ubicadas en los extremos, la cubierta tiene resuelto el flujo de aguas lluvia.

Fig 50. El orfanato de Ámsterdam de Aldo van Eyck. Autor: @CCA Mellon Lectures. Imagen recuperada de Plataforma Arquitectura: <https://www.archdaily.com/151566/ad-classics-amsterdam-orphanage-aldo-van-eyck/50380ed428ba0d599b000bcb-ad-classics-amsterdam-orphanage-aldo-van-eyck-photo>.

Fig 51. Remodelación de salas del colegio Saint George, en Santiago, por Elton & Deeves. Autor: @María Francisca González. Imagen recuperada de Plataforma Arquitectura: <https://www.archdaily.co/co/958977/remodelacion-de-salas-patios-y-pasillos-del-colegio-saint-george-elton-and-deeves/60590e10f91c81a5e9000a73-remodelacion-de-salas-patios-y-pasillos-del-colegio-saint-george-elton-and-deeves-modelo-02>

Fig 52. Remodelación de salas del colegio Saint George, en Santiago, por Elton & Deeves. Autor: @María Francisca González. Imagen recuperada de Plataforma Arquitectura: <https://www.archdaily.co/co/958977/remodelacion-de-salas-patios-y-pasillos-del-colegio-saint-george-elton-and-deeves/60590d50f91c81a5e9000a6e-remodelacion-de-salas-patios-y-pasillos-del-colegio-saint-george-elton-and-deeves-escantillon-01>

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN



53.

ORIENTACIÓN SOLAR

Respecto a la orientación de la abertura del componente, se realizaron estudios de la carta solar de Puerto Williams y se compararon con las ciudades base de Santiago y Antofagasta sobre un componente base. Como se observa en la Figura 53, se considera el grado de elevación del sol respecto a los lugares los días del solsticio de verano, el equinoccio y el solsticio de invierno. Para el caso del componente, al ubicarse en el Parque Omora, que no se encuentra abierto durante los meses de invierno, se considera el recorrido del sol para los meses de verano y el equinoccio. Con un ángulo de aproximadamente 69° en el solsticio de verano y de 35° durante el equinoccio de primavera y otoño, se lleva a cabo el diseño del componente constructivo.

FORMA Y ENSAMBLADO

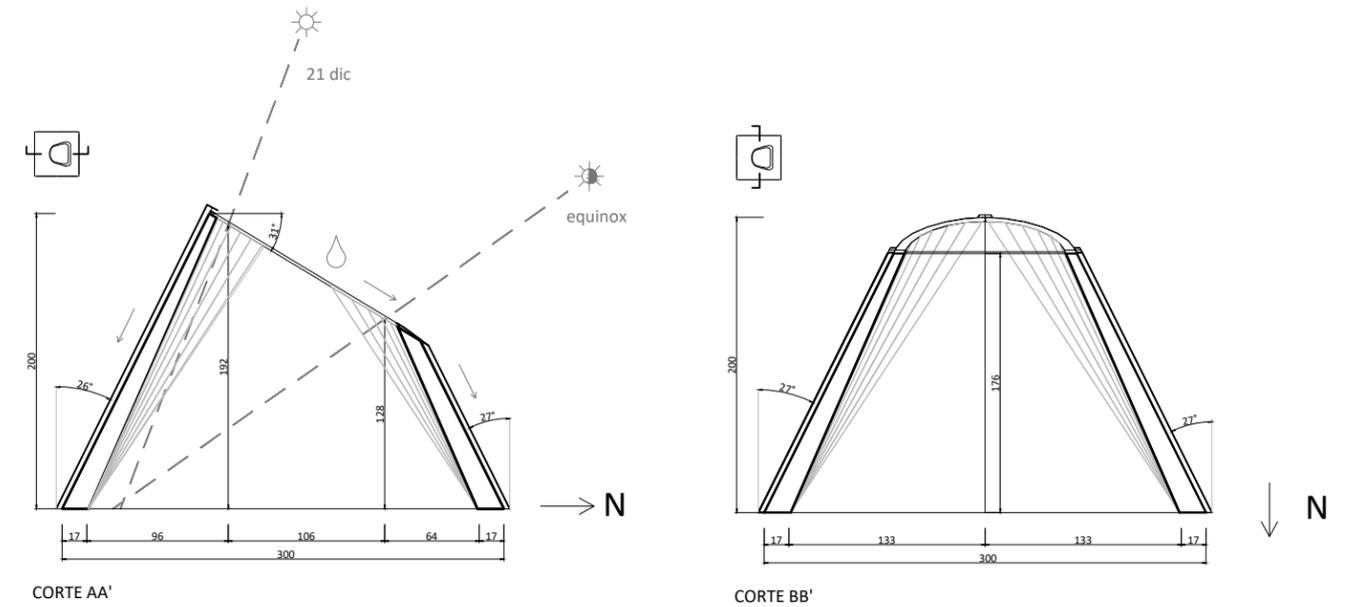
El componente constructivo contempla una ventana cenital, cuya forma y ángulo se vio determinada por la orientación solar del lugar. La parte de micelio tiene un espesor aproximado de 15cm, con piezas que en sus bordes tienen nervaduras para facilitar su unión. La unión de estas piezas es a través de un perfil metálico con dientes que abarcan el largo completo de cada pieza. La placa metálica dentada no sólo tiene la función de conectar las piezas de micelio, sino que sobre esta irán además las láminas de zinc. Estas láminas corresponden a la capa impermeabilizante, la cual, al no ser biodegradable, se puede desconectar del componente al momento de descartar una de las partes. Si bien nos encontramos frente a un componente multicapa, la idea de remover una de sus partes radica en la biodegradabilidad de la parte de micelio, y la opción de cambiar la pieza que se haya degradado. Como se mencionó anteriormente, el componente se posa sobre vigas, y en sus intersecciones hay canales que guían el exceso de agua que pueda caer sobre la cubierta.

Fig 53. Ángulos de incidencia solar sobre el componente base, en las ciudades de Puerto Montt, Santiago y Antofagasta. Elaboración propia.

Fig 54. Cortes en sentido transversal y longitudinal del componente y sus partes. Elaboración propia.

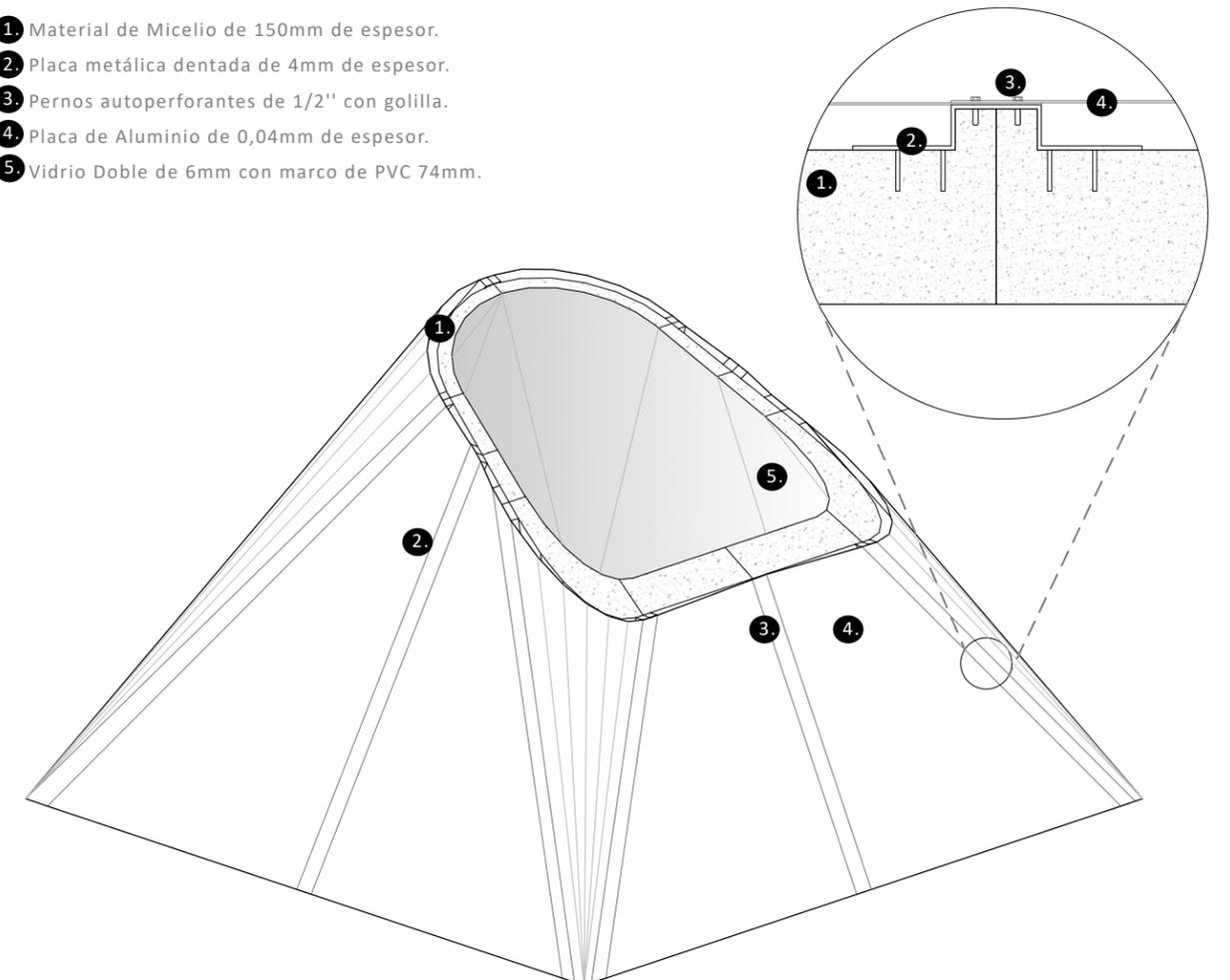
Fig 55. Isométrica con detalle del componente constructivo. Elaboración propia.

52



54.

1. Material de Micelio de 150mm de espesor.
2. Placa metálica dentada de 4mm de espesor.
3. Pernos autoperforantes de 1/2" con golilla.
4. Placa de Aluminio de 0,04mm de espesor.
5. Vidrio Doble de 6mm con marco de PVC 74mm.



53

55.



56.

VII. CONCLUSIONES

Fig 56. Cementerio de Igualada, de Enric Miralles y Carmen Pinós. Imagen recuperada de Plataforma Arquitectura: <https://www.archdaily.com/151566/ad-classics-amsterdam-orphanage-aldo-van-eyck/50380ed428ba0d599b000bcb-ad-classics-amsterdam-orphanage-aldo-van-eyck-photo>.

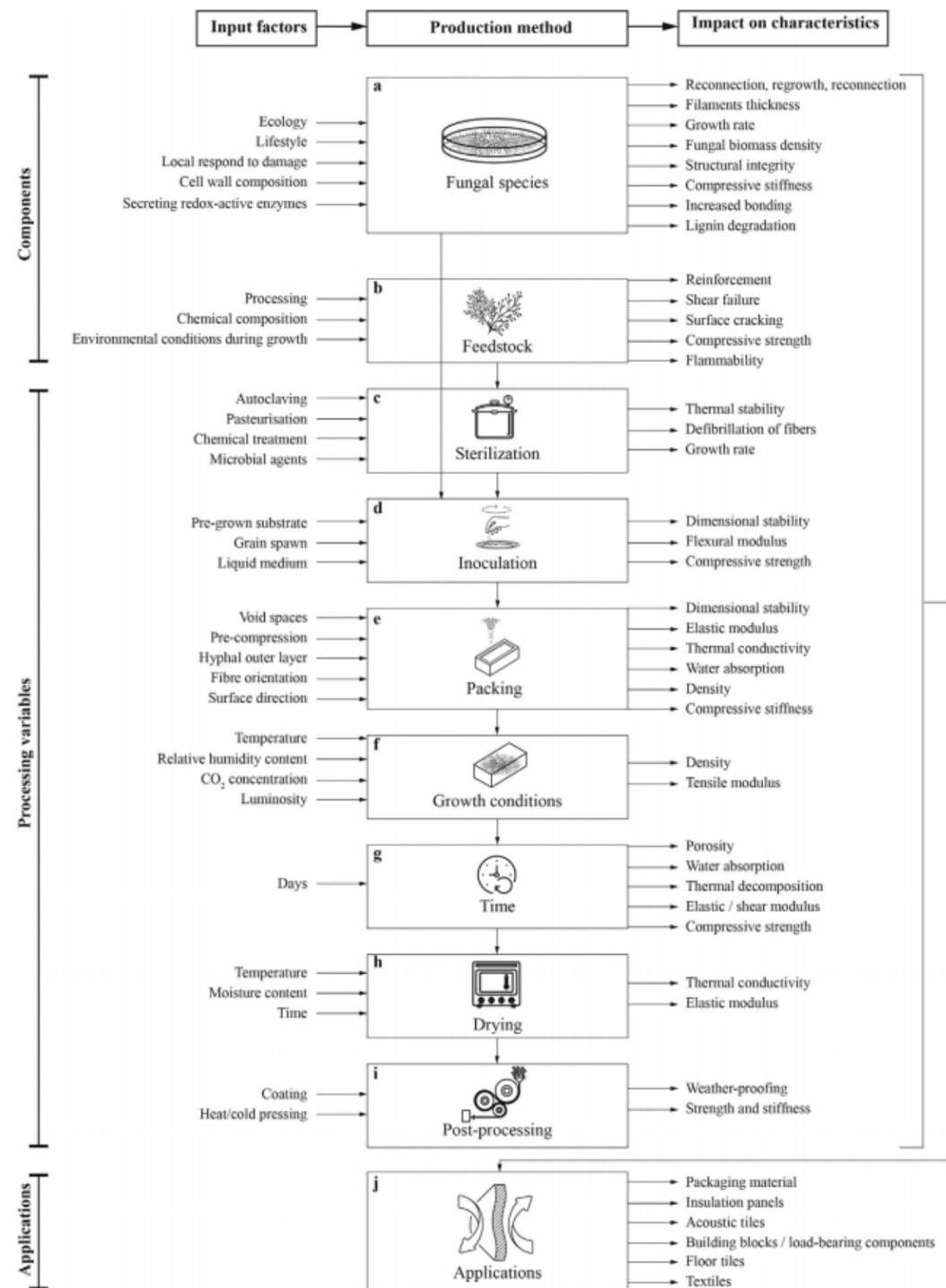
Es importante mencionar, que el material a base de micelio contempla muchas dificultades en su formación, ya que utilizamos el crecimiento de un organismo vivo. Este proceso involucra múltiples factores, y como se ha mencionado anteriormente, al literatura que ahonde sobre el material en el mundo de la construcción es limitada. Respecto a esto, se desea destacar el potencial que tiene y la necesidad de continuar con mayores investigaciones en relación a las propiedades que pueda adquirir el material. Esto puede ser a través de procesos de post-producción como son los revestimientos, algún tipo de prensado, o con la adición de otros elementos como es el caso del componente constructivo presentado.

El compuesto de micelio, usualmente entendido como un material aislado de pequeña escala, se puede complejizar aún más, integrando otros elementos que permitan un mejor desempeño a una mayor escala, como componente estructural. La incorporación de otros materiales al compuesto a base de micelio, no sólo ofrece nuevas prestaciones al componente constructivo, sino que también le da un carácter autónomo, proporcionándole independencia y durabilidad, junto con la capacidad de enfrentarse a agentes ambientales. El componente se desarrolla como una solución constructiva replicable y adaptable para una envolvente con otros programas en su interior, ya que es capaz de enfrentarse a ambientes adversos, como el entorno natural de los bosques subantárticos de Chile.

Este proyecto contempla factores sin precedentes, como lo es la implementación del material a base de micelio como elemento constructivo y la proyección de una envolvente ubicada bajo tierra en un parque de bosques subantárticos. Los desafíos que presenta la conservación y preservación de la naturaleza en un parque austral obligan a que el centro

de interpretación se proyecte en un marco de respeto por el contexto natural histórico. Junto con las limitaciones de transporte y construcción con un material a base de hongos, el proyecto se funda sobre una base de bajo impacto medio ambiental, implementando un sistema de almacenamiento del material de micelio que fomenta la construcción in situ. El mismo componente de micelio ofrece una solución constructiva sustentable por su bajo consumo energético y su característica biodegradable, cuya vida útil nace y fallece en la naturaleza misma. Este proyecto favorece la generación y regeneración de su material constructivo, sentando nuevas bases que contemplan no sólo el origen de los elementos constructivos, sino también su fin.

Finalmente, se desea profundizar la investigación en torno a este tipo de materiales dado el contexto de emergencia en el cual nos encontramos. Un material aislante y resistente que se incorpore de forma modular en una construcción, para luego ser compostado en la tierra, ofrece un sinfín de oportunidades para enfrentarnos a los desafíos que nos impone el cambio climático. Existe la posibilidad de desarrollar materiales cuya generación, uso y desecho forman parte de una economía circular y son amigables con el medio ambiente. Los materiales a base de micelio son una de estas posibilidades.



57.

Fig. 57. Marco ilustrativo de los principales factores que afectan a los métodos de producción de materiales a base de micelio y el consiguiente impacto en la caracterización. Rescatado de: Elsacker, E., Vandeloos, 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, 138431.

VII. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 & Design*, 161, 64–71.

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, 119037.

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), e0213954.

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, 138431.

Fernández González, A. (1993). Evolución del mundo tecnológico de los tableros de madera. 4, 273-282.

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(1), 41292.

Islam, M., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. (2018). Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites. *Journal of Materials Science*, 53(24), 16371-16382.

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>

Karana, E., Blauwhoff, D. R. L. M., Hultink, H. J., & Camere, S. (2018). When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-based Materials. *International Journal of Design*, 12(2), 119.

Lelivelt, R., Lindner, G., Teuffel, P., Lamers, H., & SD, U. S. D. (2015). The mechanical possibilities of mycelium materials. Eindhoven university of technology (TU/e).

Rodriguez, S. (2016). Mycelium: Material biobasado, compuesto del micelio del hongo *Trametes Versicolor* y cáscaras de nuez *Juglans Regia* (<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143763>) [Tesis, Universidad de Chile]. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/cl/>

Sabantina, L., Kinzel, F., Hauser, T., Többer, A., Klöcker, M., Döpke, C., Böttjer, R., Wehlage, D., Rattenholl, A., & Ehrmann, A. (2019). Comparative study of *Pleurotus ostreatus* mushroom grown on modified PAN nanofiber mats. *Nanomaterials*, 9(3), 475.

Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M., & Amstislavski, P. (2017). Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017030.

Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). Manual práctico del cultivo de setas: Aislamiento, siembra y producción. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, México.

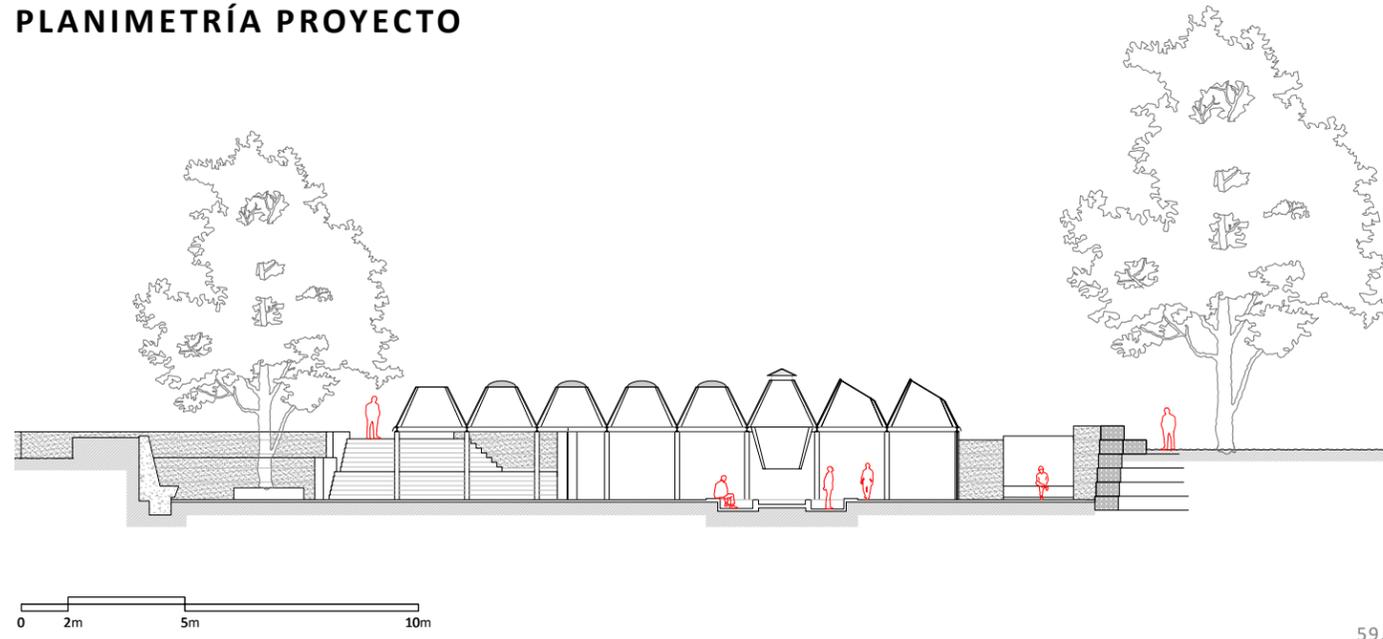


58.

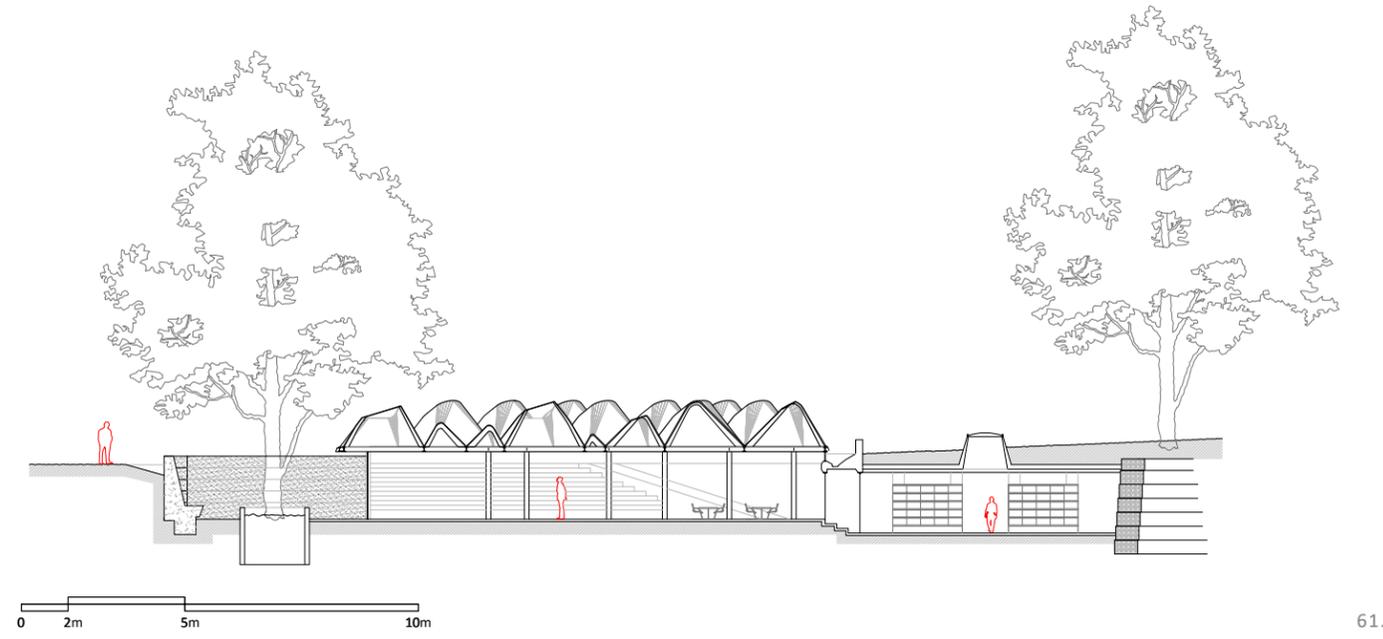
VIII. ANEXOS

Fig 56. Vista Exterior del proyecto, desde la entrada oriente del Centro de Visitantes.
Elaboración propia.

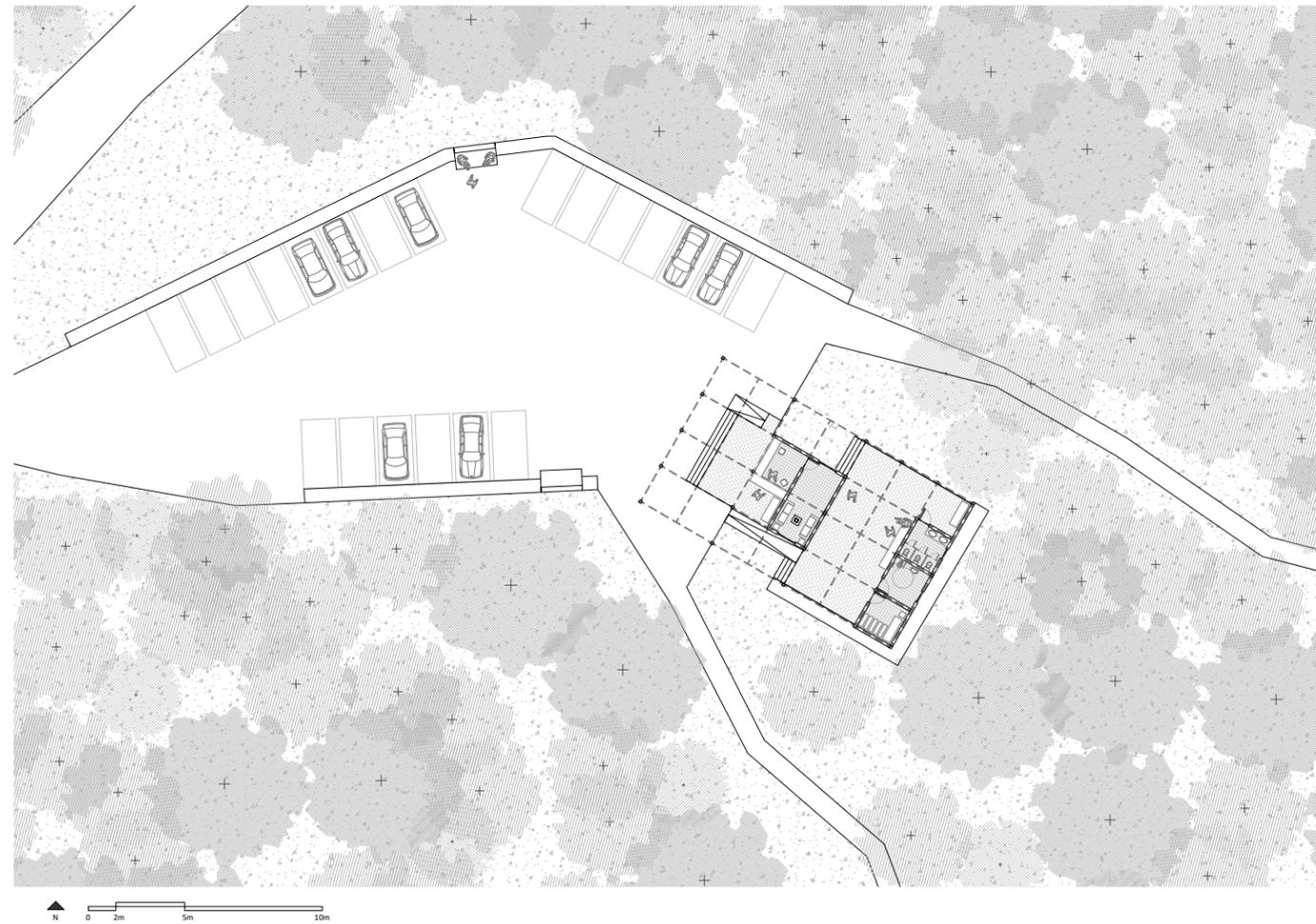
PLANIMETRÍA PROYECTO



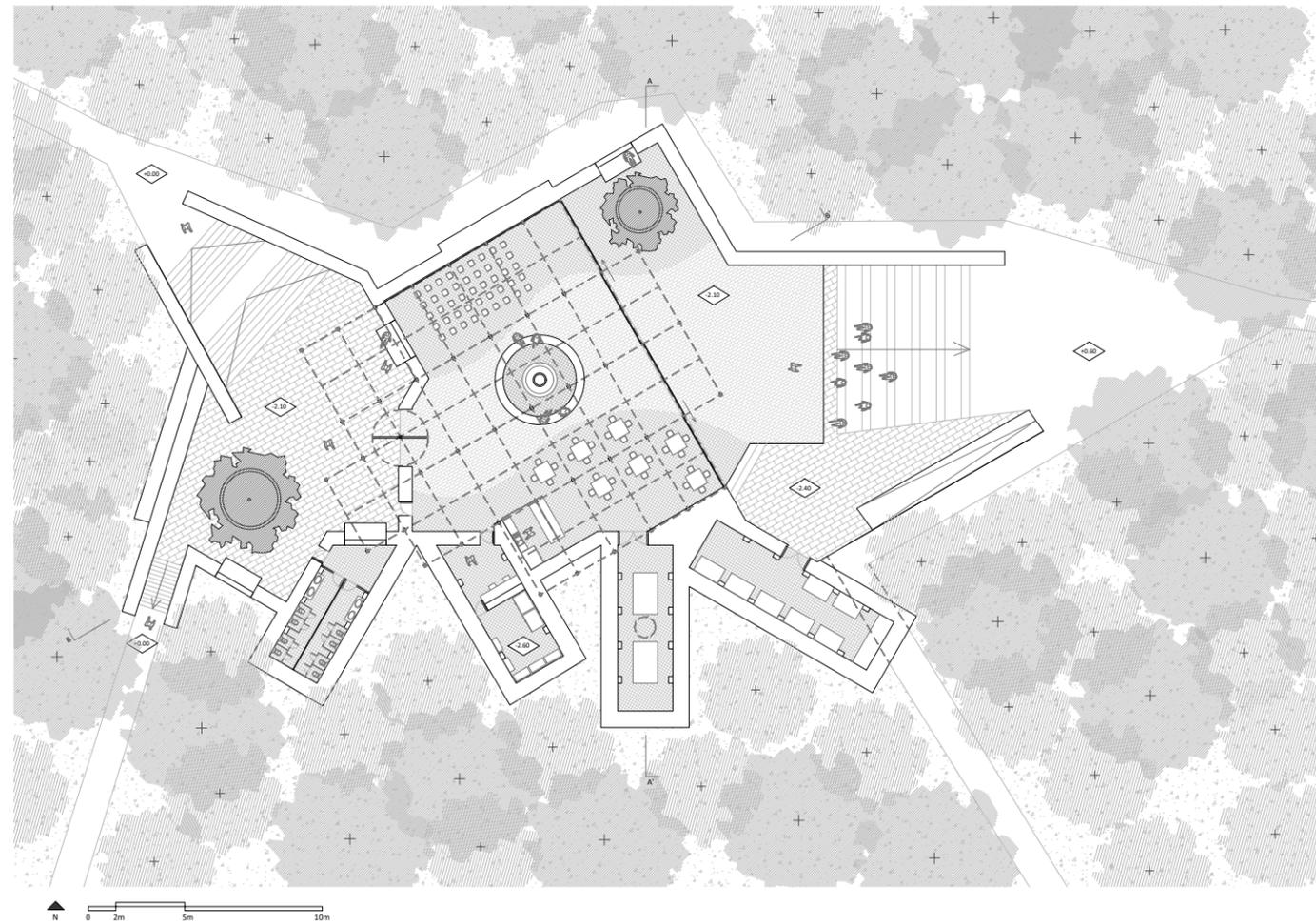
59.



61.



60.



62.

Fig 59. Corte AA' en sentido vertical respecto a la planta en página 47 (Figura 49). De izquierda a derecha; patio en el lado norte, salida del centro de visitantes por el lado oriente, cafetería y la sala de cultivo del laboratorio. Elaboración propia.

Fig 60. Planta de Acceso al Parque Omora. Incluye recepción, sala de introducción, bodega y baños. Elaboración propia.

Fig 61. Corte BB' en sentido de la cubierta respecto a la planta en página 47 (Figura 49). De izquierda a derecha: patio de acceso por el poniente, puerta de entrada al centro de visitantes, chimenea central y la salida a los senderos por el poniente. Elaboración propia.

Fig 62. Planta del Centro de Visitantes. Detalles en página 47, Figura 49. Elaboración propia.

EXPERIMENTACIÓN PROPIA CON EL MICELIO



63.

En el contexto de la pandemia mundial a raíz del virus COVID-19, la mayor parte de los primeros experimentos se llevaron a cabo en el hogar. Durante el transcurso del segundo semestre de 2020, se trabajó con casi todas las etapas del proceso de biofabricación para la manufactura de materiales a base de micelio desde casa.

En primer lugar, se realizó el cultivo in vitro de la cepa *Pleurotus Ostreatus* en dos placas Petri, facilitadas por el laboratorio de biofabricación UC. A partir de una placa madre y en un ambiente estéril, se extrajeron dos piezas de micelio y se ubicaron en dos placas Petri con un medio de cultivo de agar papa dextrosa. Durante la etapa de crecimiento de ambas placas, se fotografió diariamente la colonización del micelio.

Se detectaron contaminaciones en ambas muestras, destacándose la presencia de otro hongo en una, y bacterias en el perímetro de la placa de la segunda muestra. Esto ejemplifica la importancia de un cuidado adecuado del cultivo, especialmente en el proceso de clonación.

En segundo lugar, se realizó el Spawn, el cual consiste en alimentar el micelio con arroz integral en condiciones de completa oscuridad. Para ello se esterilizó un frasco con arroz integral cocido, con una tapa perforada con algodón siliconado como filtro entre el interior y el exterior. A continuación, se insertó una porción de micelio colonizado (esto

es, alimentado por PDA). El micelio se dejó crecer por dos semanas.

Se observa en las imágenes que, en los últimos días, el Spawn mostró señales de exceso de humedad en el fondo, razón por la cual se muestran estratos de éste. La humedad dificulta el crecimiento del micelio y se vislumbra incluso un color rojizo en el algodón que media entre el exterior y el interior del frasco. Finalmente se rescata el Spawn que hay en la superficie y se almacena en otro frasco con más arroz.

En tercer lugar, se realizó la producción del material, el cual incorpora un sustrato de cáscara de nueces trituradas. Para este proceso, se esterilizó el sustrato en una olla a presión, pues como se mencionó anteriormente, el experimento se realizó en casa. Una vez listo, el sustrato se vio colonizado por el Spawn previamente cultivado, con la adición de harina autoclavada y café reciclado (también esterilizado bajo olla a presión previamente).

Se detecta inicialmente un crecimiento muy lento del material, por lo que se opta por dividirlo en dos partes y ubicarlo en diferentes lugares para observar qué condiciones se presentan de forma más ideal para el crecimiento de este. Luego, se miden las condiciones de crecimiento del material y su entorno directo, tomando en cuenta temperatura radiante y del aire, humedad relativa y pun-



64.

to de rocío. El experimento dio como resultado un crecimiento significativamente mayor al del primer estado del material.

Finalmente, para la post-producción del material, se ubica el sustrato de cáscara de nuez colonizado en un molde de 25x40cm, cuyo espesor se encuentra definido por el sustrato, el cual inicialmente corresponde a 4cm. Durante el crecimiento del material al interior del molde, se le aplicó una presión con una prensa manual en el taller de herramientas UC, por 2 semanas. El tablero, una vez desmoldado, se dejó secar en el laboratorio para permitir que lo cubra una capa de micelio antes de hornearlo.

Sin embargo, como se aprecia en la imagen, el micelio presente en el tablero se debilitó lo que conllevó a que éste se deshiciera por completo. Esto se puede deber a la presencia de posibles contaminaciones, o de humedad.



Fig 63. Fragmentos del proceso de crecimiento de cultivo in vitro de la cepa *Pleurotus Ostreatus*. Elaboración propia.

Fig 64. Fragmentos del proceso de crecimiento de Spawn de arroz integral con la cepa *Pleurotus Ostreatus*. Elaboración propia.

Fig 65. Tablero de micelio con sustrato de cáscara de nuez 2 días tras ser desmoldado. Elaboración propia.

65.

EXPERIMENTACIÓN PROPIA CON TABLEROS A BASE DE MICELIO



66.

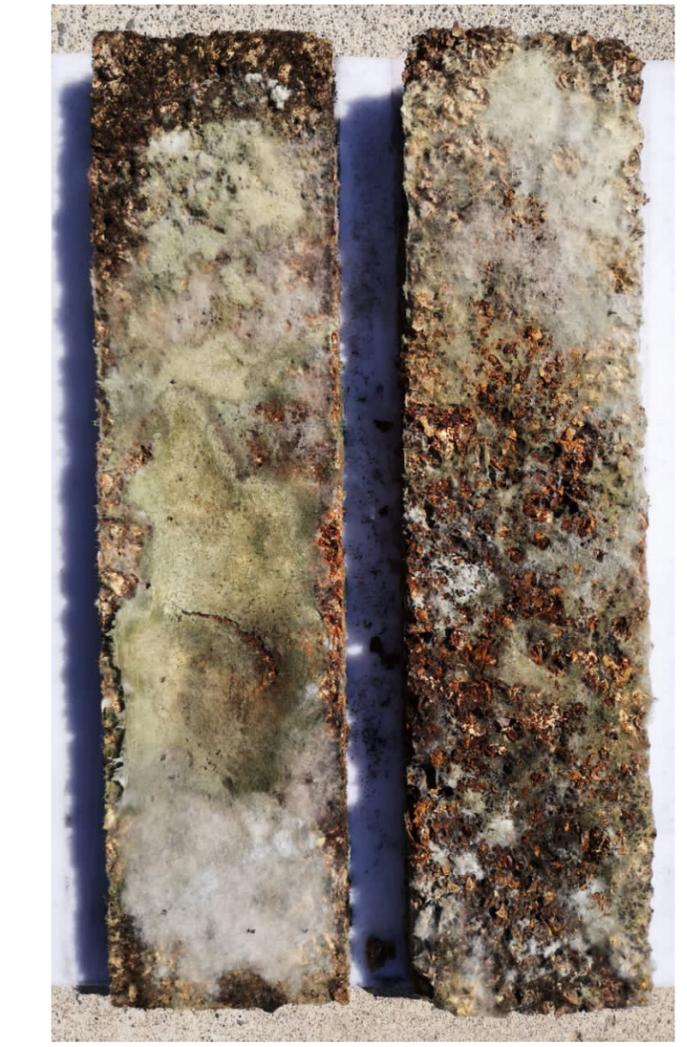
Cuando se abrió la oportunidad de trabajar directamente en el laboratorio, se propuso trabajar con un sustrato también de origen nacional; la cáscara de almendras. El procedimiento inicial es el mismo, solo cambia el sustrato y su tamaño, que en este caso corresponde a cáscaras de no más de 5mm. El crecimiento del sustrato se dividió en 2 bolsas; la primera de 2,3kg y la segunda de 2,5kg, donde el sustrato fue colonizado durante dos semanas. Como primera variable, se propuso mezclar una de las bolsas (N°1) luego de una semana de crecimiento. A partir de la literatura, remover el sustrato y romper levemente el micelio puede fomentar un nuevo crecimiento y mayor fuerza en la red de hifas, ya que deben volver a entrelazarse. La bolsa N°2 se dejó intacta.

Luego de dos semanas, los sustratos colonizados fueron depositados en 4 moldes de 40x10cm, cuyo espesor se determina por la cantidad de sustrato por molde, que corresponde a 700gr cada uno. El molde A y el molde B contienen la mezcla de la bolsa N°1, mientras que los moldes C y D contienen el sustrato de la bolsa N°2. Como segunda variable, se le aplicó peso durante el crecimiento del material en los moldes B y D, ambos con 21kg sobre el moldaje. Después del crecimiento en el molde por 10 días, se desarmaron los moldes, quedando 4 tableros de diferente aspecto y espesor debido a las variables en su proceso de biofabricación. Los tableros se dejan secando por un par de días al interior de un mueble en oscuridad, para fomentar el crecimiento de una capa micelar en la superficie expuesta.



67.

Finalmente, los tableros son horneados en un horno eléctrico convencional por 20min a 170°C y por 40min a 100°C. Los moldes C y D presentaron humedad en su superficie, por lo que se le añadieron 20 min a 100°C. Lamentablemente, se observa que días después del proceso de secado hay humedad presente en el material, debido a la presencia de otro hongo en la superficie de estos. Existen múltiples variables que pudieron haber contribuido a este problema. Los tableros se almacenaron en un espacio reducido, oscuro y cerrado, esto podría haber facilitado la putrefacción de ellos. Por otro lado, es posible que el horno utilizado no haya tenido la potencia suficiente para secar el material. Se concluye que los tiempos y/o grados de cocción no son suficientes para el secado total para los tableros de este tipo.



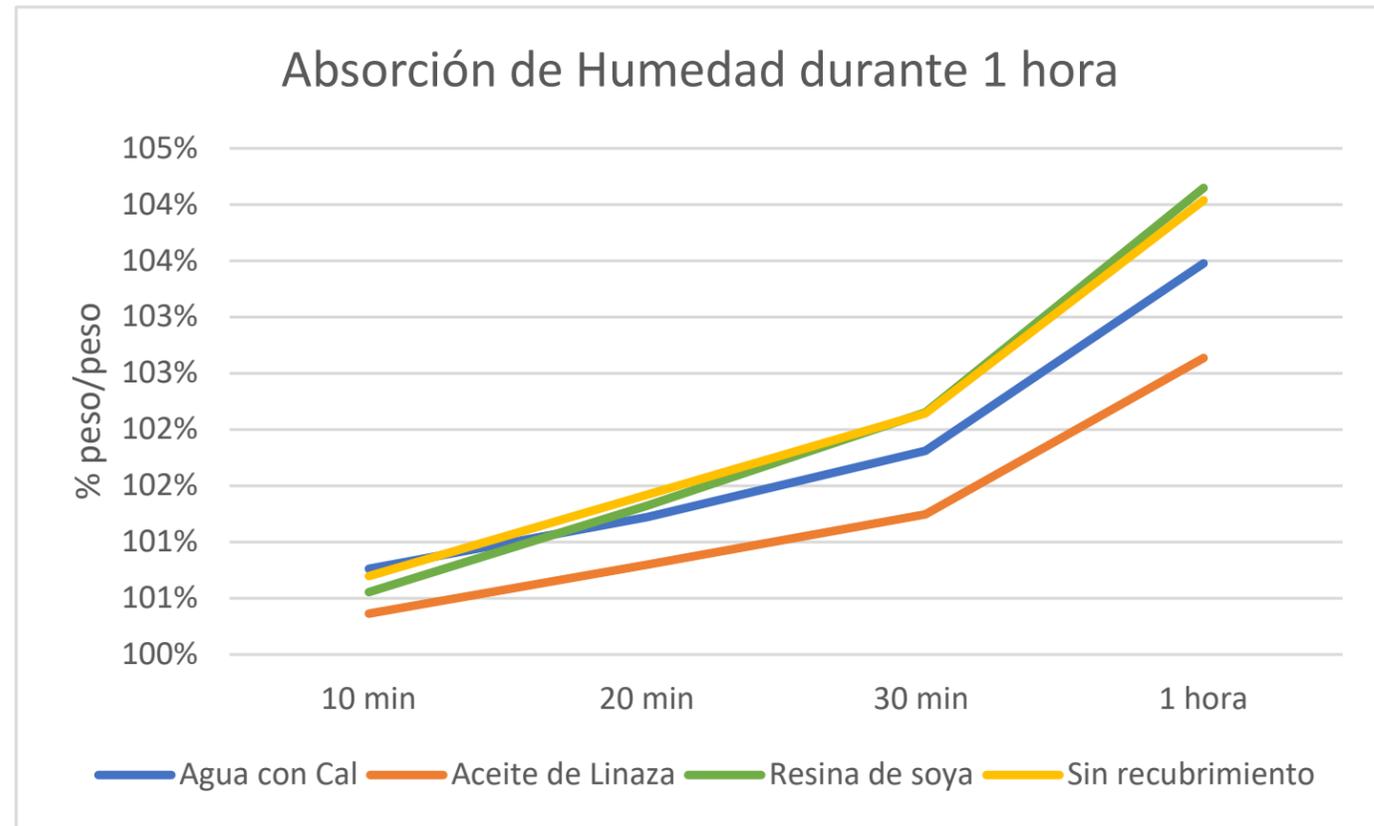
69.

Fig 66. Moldes A, B, C y D de cáscara de nuez recién desmoldados de 10x40cm con diferentes espesores. Se distingue la diferencia de color debido a la mezcla durante el proceso de crecimiento de los moldes B y C. Elaboración propia.

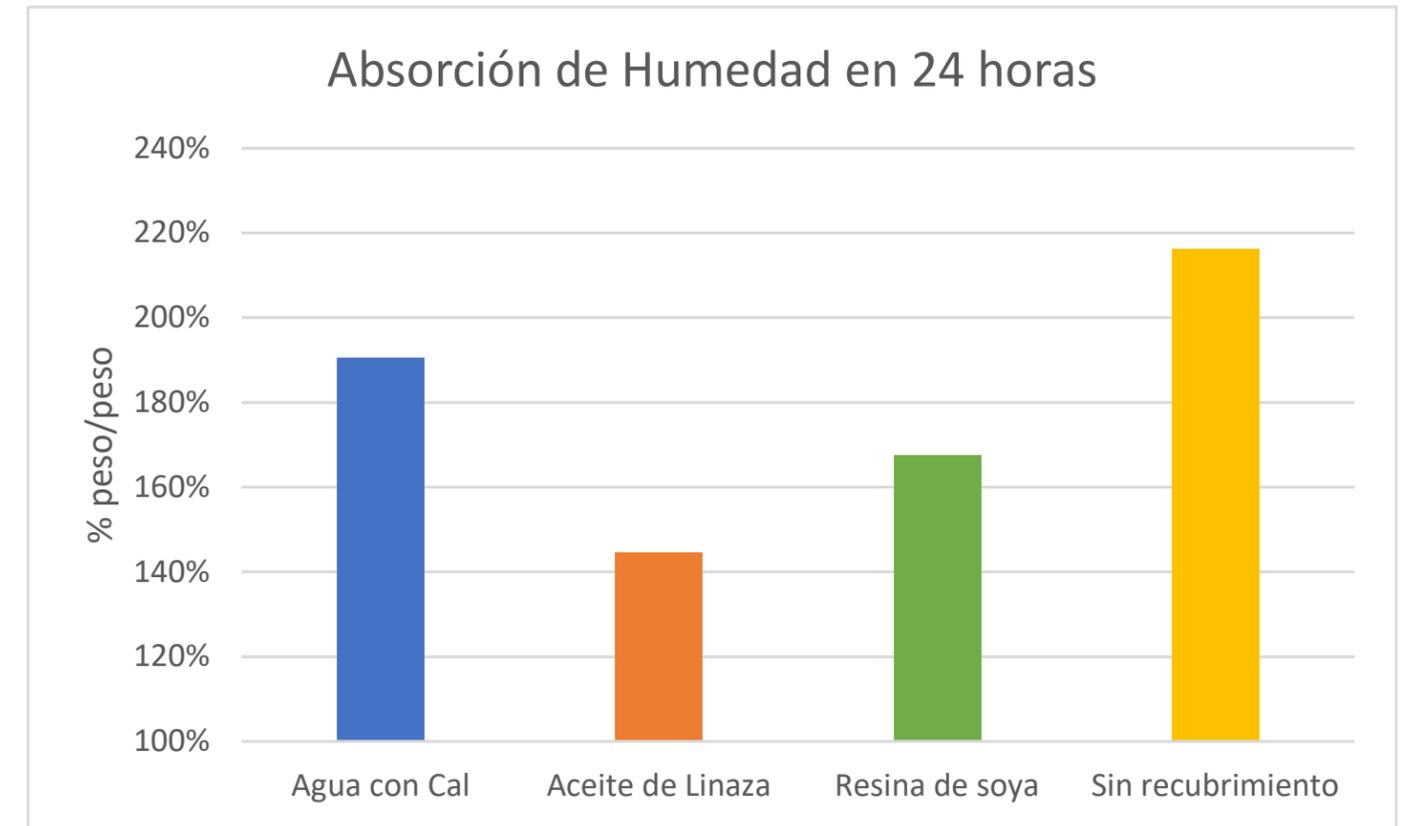
Fig 67. Moldes A y B de cáscara de nuez podridos, una semana luego de ser horneados. Elaboración propia.

Fig 68. Moldes C y D de cáscara de nuez podridos, una semana luego de ser horneados. Elaboración propia.

EXPERIMENTACIÓN DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD



70.



71.



73.



74.



75.



76.

Se sometieron a prueba 4 bloques de micelio con 3 terminaciones diferentes para definir qué recubrimiento es el más óptimo en términos de absorción de humedad. La prueba se realizó al interior de un indoor tipo comercial, con un vaporizador de aire en su interior. La humedad que generada es cercana al 100%. Se comparó el peso húmedo de cada bloque con su peso original (seco), cada 10, 20, 30 y 60 minutos (Figura 70) y el valor total del peso ganado en 24 horas (Figura 71).

Como se observa en los gráficos, se destaca la baja absorción de agua de parte del bloque con aceite de linaza, tanto a corto como a largo plazo. El recubrimiento de agua con cal parece funcionar a corto plazo, sin embargo al cabo de un día, la resina de soya aumentó su peso en un 145%, en comparación con la cal, que fue de un 190%. Se recomienda, independiente de la terminación, recubrir el material de micelio, pues las tres terminaciones obtuvieron mejores resultados que el bloque sin recubrir. Finalmente, se concluye que en términos de absorción de agua, el aceite de

linaza es lo más recomendable. Sin embargo, si se desea obtener un acabado más fino y prolijo, es recomendable añadir un par de coladas de agua con cal, ya que su alto pH previene la aparición de hongos en su superficie.

Fig 70. Gráfico de Absorción de agua durante una hora de bloques de micelio revestidos con agua con cal, aceite de linaza, resina de soya y sin recubrimiento.. Elaboración propia.

Fig 70. Gráfico de Absorción de agua durante 24 horas de bloques de micelio revestidos con agua con cal, aceite de linaza, resina de soya y sin recubrimiento.. Elaboración propia.

Fig 72. Bloque de micelio con sustrato de viruta de madera roja inoculada con P. Ostreatus. Recubierto con agua con cal. Elaboración propia

Fig 72. Bloque de micelio con sustrato de viruta de madera roja inoculada con P. Ostreatus. Recubierto con aceite de linaza. Elaboración propia.

Fig 72. Bloque de micelio con sustrato de viruta de madera roja inoculada con P. Ostreatus. Recubierto con resina de soya. Elaboración propia.

Fig 72. Bloque de micelio con sustrato de viruta de madera roja inoculada con P. Ostreatus. Sin recubrimientos. Elaboración propia.

¿Cuál es tu relación con los biomateriales a base micelio?

Bueno, ya partí en el pregado trabajando con biomateriales. Después de eso, colabore en algunos cursos y Workshop que se realizaon en la Universidad Católica y colaboré con el profesor Fernand Ferderici, Francisco Chateau y Alejandro Soffia en un Workshop llamado Biodesign (2016). Este fue el primer Workshop que trataba o vinculada la biología con la arquitectura y el diseño. En ese Workshop hubo charlas que incorporaron a David Benjamin y Phillip Ross, personas experimentadas en este tipo de materialidades. Terminando mi pregado, me invitaron a hacer un Workshop práctico de biomateriales donde explicaba a grandes generalidades como se desarrollaban los biomateriales y la metodología que había desarrollado. Desde ese momento es que he seguido trabajando con biomateriales. Después de eso empecé a hacer algunas ayudantías en diseño, hace poco ya soy profesor de diseño en la escuela de diseño y arquitectura y hemos realizado talleres y optativos de profundización en biofabricación. Mas que nada me he ligado a los biomateriales desde la investigación.

Desde el laboratorio nos hemos adjudicado tres fondart de investigación de diseño, donde hemos querido desarrollar estos biomateriales. El primero era el desarrollo de un sistema constructivo a base de un componente de micelio de hongos, ahí la gran falla fue la de no entender bien como crecía el material, ya que se forzó el material a que funcionara como un componente constructivo y no a que entender cómo este podía crecer y desde allí diseñar. En el segundo Fondart desarrollamos el textil y micotextil, el cual fue exitoso ya que logramos desarrollar una lámina y el equipamiento que permitiera cultivarlo, que en este caso fue una incubadora de bajo costo. La idea era publicar de forma abierta ambas investigaciones, es decir, que la receta del micotextil estuviera compartida al igual que el método de cómo construir una incubadora. En el tercer Fondart estamos desarrollando una metodología que permita aproximarse a organismos vivos al momento de hacer una práctica en biofabricación. Nos hemos dado cuenta que en realidad es difícil definir una metodología porque hay muchos factores de por medio, como puede ser el acceso a la información, infraestructura, ubicación, entre otros. Entonces estamos desar-

rollando una deriva que permita aproximarse de una manera mucho más simbólica a los organismos vivos y de ahí proyectar desde el diseño y la arquitectura.

En el segundo Fondart desarrollamos el textil y micotextil, el cual fue exitoso ya que logramos desarrollar una lámina y el equipamiento que permitiera cultivarlo, que en este caso fue una incubadora de bajo costo. La idea era publicar de forma abierta ambas investigaciones, es decir, que la receta del micotextil estuviera compartida al igual que el método de cómo construir una incubadora. En el tercer Fondart estamos desarrollando una metodología que permita aproximarse a organismos vivos al momento de hacer una práctica en biofabricación. Nos hemos dado cuenta que en realidad es difícil definir una metodología porque hay muchos factores de por medio, como puede ser el acceso a la información, infraestructura, ubicación, entre otros. Entonces estamos desarrollando una deriva que permita aproximarse de una manera mucho más simbólica a los organismos vivos y de ahí proyectar desde el diseño y la arquitectura.

¿Respecto al primer Fondart, a que te refieres con "entender el material"?

Ahí nos pasó que estábamos entendiendo de mejor manera cómo crecía el hongo, entonces a medida que entendíamos como crecía, ya se estaba diseñando el sistema constructivo. Este era como un encofrado, pensado como un machihembrado grande. Como el volumen era de gran tamaño, la gran cantidad de biomasa nunca iba a poder colonizarse del todo por el calor. El crecimiento funcionó en probetas más pequeñas (molde de pie), pero el paso al elemento constructivo ocurrió sin una buena comunicación. Por eso digo que nos faltó abarcar o entender más este proceso biológico, entender que hay un límite de biomasa que es perjudicial. Yo creo que igual fue un buen ejercicio porque nos dimos cuenta de hartas cosas.

¿Cómo definirías el micelio? Y un componente a base de micelio?

El micelio es el cuerpo vegetativo del hongo y está compuesto por hifas, que sería la definición más técnica. El hongo que nosotros vemos en el bosque es el cuerpo reproductivo.

Un componente de micelio, usa un organismo vivo

para producir algún tipo de cambio en la estructura de un sustrato. Estamos trabajando en esa definición y concluimos:

En el proceso de biofabricación, ¿que rol juega el sustrato?

Yo creo que es una parte importante, al igual que el hongo, pero desde la metodología es importante definir alguna de las variables. Por ejemplo, si estamos preguntándonos el rol del sustrato, yo tendería a pensar que en este caso estamos probando solo con un tipo de hongo. Porque de ese modo voy a saber que tan bueno es un sustrato respecto al otro. Los sustratos son importantes en la medida de que respondan a lo que estamos buscando. Si estas buscando material que pueda comprimirse y utilizarse para un tablero, es importante en este caso el material permita que se pueda compactar y que exista aire entre medio de las partículas, fomentando su rigidez. Por un lado está la definición del hongo, pero por otro lado están las definiciones del material. Si voy definiendo las variables del material, me es más fácil definir un sustrato. Por ejemplo, si quiero que mi material tenga una baja densidad, quizás me va a convenir utilizar rastrojo de trigo, como los ladrillos que están en el laboratorio, que tienen una baja densidad y permiten un volumen más o menos grande. El sustrato es importante en la medida que también le integres variables, tanto desde lo que esperas que sea el material y también el hongo que estés utilizando.

Mi hipótesis considera que un sustrato de cáscara de nuez con la adición de virutas de madera podría ser rígido por la dureza de la cáscara y a la vez resistente como los tableros de madera. ¿Que pasaría si a un sustrato de cáscara se le agrega una fibra natural de madera?

Encuentro interesante la hipótesis que un tablero conformado por virutas de madera y cascara de frutos secos va a ser más resistente que un tablero solamente conformado por cáscara. Ahí quizás deberían buscar qué es lo que estas buscando en esa comparación. Se entiende en tu hipótesis que estás comparando propiedades de resistencia entre un tablero de cáscara con tablero de cáscara y viruta, y eso lo supones porque sabes cómo se comportan los tableros de viruta de madera. A mi me da la impresión que si funcionaria, dependiendo del tamaño que le des a los sustratos. Una

primera consideración sería que el tamaño de las partículas sea diferente. Las cascara pueden ser de un tamaño en particular y las fibras de otro. La diferente granulometría permite diferentes cantidades de aire entre ellas y eso beneficia a la resistencia. Así que es como funcionan los tableros de madera aglomerada, en cuyo borde la fibra es mucho más larga que la que se encuentra en el centro. Ahí se podría homologar a un tablero de madera aglomerada, definiendo áreas y tamaño de partículas. Es importante además definir las probetas y dónde ubicar los sustratos, si la viruta se ubica como cobertura o mezclada con la cáscara, etc.

¿Cuáles son las variables más importantes para lograr una mayor resistencia de un compuesto a base de micelio?

El tipo de sustrato que incorpores, como menciona Haneef et al (2017), que plantea que un sustrato fácil de digerir (con azúcares accesibles) resulta en un material mucho más blando. Si el sustrato es más complejo, el hongo se demorará más en digerirlo, vas a generar una red mucho más resistente. Una viruta de madera blanda funcionaria bien combinando una cáscara dura de algún fruto seco, que se demora mas en digerir. En ese caso es importante considerar las variables del tamaño de la partícula de viruta y de la cáscara del fruto seco... Quizás a partir de investigaciones previas. Debe haber una combinación de tipos de tamaños y de granos. En este caso, la cáscara de fruto seco representa un mayor juego de tamaño, ya que la viruta en general viene en un tamaño determinado.

¿Cuál es el espesor máximo ideal para que el micelio colonice de forma homogénea?

Máximo 30mm de ancho, de los que hemos probado, y no funcionaban tan bien. Por ejemplo, los ladrillos que utilizamos eran más anchos, de 50mm. Es difícil unir tanta biomasa, en el caso del rastrojo de trigo funcionó como una matriz y por su largo permitió unir el material. Ahí te puedes guiar por los tamaños de tableros de madera, que no son de un espesor tan grande.

¿Cuál es tu relación con los biomateriales a base micelio?

En mi caso fue una relación que partió fortuitamente en el sentido de que estudié primero biología y luego arquitectura. Cuando tenía que terminar mi línea de magíster en arquitectura me enteré que existía esta línea de investigación en el laboratorio. De hecho, el profesor Chateau se me acercó y me preguntó si quería hacer mi magíster de forma libre con él, ya que yo tenía mi experiencia como biólogo y ellos estaban desarrollando en ese momento el proyecto Monumento Abierto. Mi rol ahí fue más que nada como un desarrollador externo, donde hice un levantamiento de todo el proceso y cómo funcionaba la relación hongo-industria y levanté una suerte de crítica más neutra respecto al procedimiento, una mirada un poco más objetiva desde el punto de ya me había dado la ciencia y el nuevo aprendizaje en arquitectura.

Desde ahí que he seguido trabajando en el tema, investigando y todo. Desarrollé mi tesis en este tema, que tuvo que ver más que nada con hacer una purificación de la línea de producción, entender bien cómo es el proceso y traducir esos procesos de producción en distintos espacios arquitectónicos. Y en eso estoy, trabajando en el laboratorio, seguimos investigando. En estos momentos hacemos cursos donde participo como ayudante y en este momento en el laboratorio estoy asegurándome de que funcione bien. Durante mucho tiempo la producción del laboratorio fue súper “tincada” en el sentido de que a veces salía, otras veces no, a veces de una calidad, luego de otra. Entonces estos primeros meses que ya no estoy con mi tesis me he dedicado a tener más claro cómo funciona, cómo sale, que sea siempre repetible. Una vez que con esa base seamos capaces de replicar las cosas que nosotros mismo hacemos, tratar de comenzar a postular a proyectos y ese tipo de cosas.

¿Cómo definirías el micelio? Y un componente a base de micelio?

El micelio en sí es el cuerpo principal o la vida vegetativa de todo lo que tiene que ver con los hongos o el reino fungi en general. Dependiendo de la especie de hongo en específico cuáles son sus características propias, pero en general son redes que se interconectan entre ellas generando un gran cuerpo único. Cuando llega el momento de reproducirse sexualmente, es cuando aparece la seta, que es lo que nosotros más reconocemos. El micelio es una suerte de red unicelular que tiene la capacidad de generar uniones complejas entre ellos. Esa capacidad de generar redes complejas es lo que ha dado el paso a la aparición de este material, que básicamente lo que hace es basarse en el micelio como una suerte de pegamento o aglomerante que permite unir distintas piezas entre ellas, preferentemente piezas a través de las cuales el micelio pueda alimentarse de ellas. Entonces este material tiene la gracia de que se puede desarrollar desde materiales en descomposición o desechos y el micelio que puede unirlos como si se tratara de cemento o pegamento, pero un aglomerante 100% natural, que se puede descomponer y utilizar como composta, etc.

En el proceso de biofabricación, ¿que rol juega el sustrato? Contemplándolo como única variable.

En el proceso de biofabricación, ¿que rol juega el sustrato? Contemplándolo como única variable.

El sustrato aporta bastante a las características del material. El material de cierta forma se puede abordar desde dos vertientes; una es el micelio y la otra el sustrato. El micelio es evidente que falta mucho por hacer, son muy pocas las especies que se han trabajado. Y dentro de lo que se ha estado trabajando, la ciencia más dura recién lo está comenzando a investigar con mayor profundidad. El sustrato como la otra vertiente también tiene grandes características que pueden modificar las resistencias del elemento. He notado que es muy claro la diferencia entre la resistencia de los elementos dependiendo del tamaño y la forma del sustrato, incluso del mismo sustrato. Los sustratos grandes son complejos de trabajar, ya que genera muchos vacíos que al propio micelio le cuesta rellenar, por lo que el material era inconsistente y más fácil de quebrar. Pero cuando el material también es muy fino o solamente particulado, el elemento final es fácil de quebrar porque el único elemento que lo sostiene es el micelio. Mientras que si uno trabaja con mezclas que tengan filamentos más alargados, estos filamentos funcionan como una suerte de matriz que le brinda más estructura. Entonces, es importante saber equilibrar o mezclar distintos elementos que le sumen su resistencia propia al micelio, con un tamaño adecuado. Por ejemplo, estaba trabajando con viruta de madera, que funciona muy bien, sin embargo no es tan resistente el material como el que consiguió Luciano.

Y la única diferencia entre ese tipo de material y el nuestro es el tamaño de la viruta. Hay que tener mucho ojo y mucho cuidado con el tamaño de las piezas y la capacidad de desarrollar un volumen lleno, ya que afecta la resistencia del material. En la literatura se habla de la especie del sustrato, en otras palabras, la distinta disponibilidad de celulosa y lignina. Cuando le dificultas un poco el trabajo de digestión al micelio, tiende a crecer de forma más resistente. De hecho los materiales que tienen estructuras más resistentes, como el cáñamo, al participar como sustrato de un biomaterial parece ser de las combinatorias posibles más resistentes.

Mi hipótesis considera que un sustrato de cáscara de nuez con la adición de virutas de madera podría ser rígido por la dureza de la cáscara y a la vez resistente como los tableros de madera. ¿Que pasaría si a un sustrato de cáscara se le agrega una fibra natural de madera?

Yo creo que es una buena combinación. La cáscara tiene la gracia que le agrega una resistencia a la compresión, mientras que la viruta tiene la gran ventaja de que rellena los espacios que deja la cáscara de nuez. Entonces ayuda a generar un material más denso y más resistente, por lo menos a la compresión. Tal vez, pensar en agregar una fibra alargada, lo que ayudaría a darle una mayor resistencia a la tracción o incluso trabajar con fragmentos de cáscara más grandes y dejar que los espacios vacíos los rellene la viruta de madera.

¿Cuál es el tamaño de granulometría de sustrato ideal para un tablero resistente?

La literatura en general lo ha tomado más del punto de vista desde el micelio que el sustrato, generalmente los papers trabajan con sustrato estándar y comparan distintas especies o distintas mutaciones. Por lo tanto, una investigación que haya probado sistemáticamente distintas granulometrías, no he encontrado. Yo creo que es una deuda desde la literatura, empezar a trabajar desde el otro lado. Eso es lo que falta comparar, y tal vez sería interesante compararlo.

¿Cuáles son las variables más importantes para lograr una mayor resistencia de un compuesto a base de micelio?

Bueno, la especie de micelio con la que estamos trabajando, yo creo que ese es uno de los factores

más importantes. Pero si estandarizamos la especie y el sustrato, que evidentemente son las grandes vertientes para buscar mayor resistencia, dentro del protocolo, yo creo que los tiempos y la temperatura justa. Cuando le permites al bloque de micelio estar más tiempo del que necesita, comienza a disminuir su resistencia porque comienza a generar metabolitos secundarios que se alimentan del sustrato y lo van debilitando. Y también, cuando las temperaturas no son correctas para el crecimiento del micelio, crece con menor densidad de la adecuada, se demora más tiempo en crecer, genera incluso que se pueda morir. Trabajar con las temperaturas y tiempos correctos te van a permitir llegar a la mejor combinatoria de materiales posibles. Lo verdaderamente importante es saber elegir el sustrato y su tamaño correcto y la especie de hongo.

¿Cuál es el espesor máximo ideal para que el micelio colonice de forma homogénea?

Eso es complicado, por experiencia propia ha funcionado bien hasta con 10cm. Con 10cm en el experimento de Monumento Abierto no resultó, ya que en su centro estaban vacíos y el crecimiento micelar era bastante acotado en los bordes. En mi caso, he conseguido hasta 10cm exitosos, pero no he seguido explorando más allá de eso. Yo creo que trabajando en condiciones absolutamente controladas, es decir, con termómetro interno, puede que si lleguemos a grosores mayores, tal vez 15 o 20cm. De hecho, Ecovative se supone que tiene un bloque de casi un metro cúbico, colonizado por completo, pero esas son condiciones extremadamente controladas. En nuestras condiciones, con un poco más de control, podemos alcanzar los 15 a 20cm de un bloque funcional.

¿Cuál es el tamaño máximo reconocido de una pieza de micelio?

Los tableros de Ecovative miden aproximadamente 1,00m por 0,50m.

En Grown-bio puedes encontrar tableros de 1230mmx830mm, con espesor de 25mm y tableros de menor tamaño, pero con un espesor de 55mm.

FICHAS DE PAPERS

Nombre de paper: Mycelium Composites: A Review of Engineering Characteristics and Growth Kinetics
Autores: Mitchell Jones, Tien Huynh, Chaitali Dekiwadia, Fugen Daver, and Sabu John
Filiación: The Royal Melbourne Institute of Technology University
Año y medio de publicación: Journal of Bionanoscience. Vol. 11, 241–257, 2017

Resumen: El agotamiento de las reservas de petróleo, junto con los problemas de gestión de desechos hace que la sustitución de muchos materiales tradicionalmente sintéticos con materiales más responsables con el medio ambiente totalmente necesarios. Los compuestos de micelio utilizan el crecimiento biológico en lugar de que los costosos procesos de fabricación de energía intensiva y requieren sólo residuos orgánicos de bajo costo como materia prima, pueden crecer para llenar geometrías complejas y son biodegradables. Esto hace que sean alternativas económica y ambientalmente viables en comparación a muchos materiales sintéticos.

El reino fúngico consiste en un rango muy extenso de especies con morfologías y propiedades muy variadas. Fuertes evidencias circunstanciales vinculan la arquitectura hifal con la resistencia a la compresión. El tipo y la concentración de polímeros de la pared celular también pueden influir en el rendimiento mecánico, ya que la pared celular define la forma y la resistencia celular. Otros elementos constituyentes de compuestos, los sustratos y los aditivos, también influyen en las propiedades de los materiales, como la resistencia a la compresión, la flexibilidad y la conductividad eléctrica. La adición de químicos y los factores exógenos como la densidad del inóculo, la temperatura, la actividad del agua y el pH pueden influir en la densidad del micelio, las concentraciones de polímeros de la pared celular y la tasa de crecimiento de los compuestos de micelio, también pueden ser factores de importancia en las investigaciones relacionadas a este tipo de material.

Los compuestos de micelio se caracterizan generalmente como materiales de grado de espuma de polímero, pero la mayoría de los estudios admiten que el rendimiento mecánico puede mejorarse a través del control de una serie de factores. Las aplicaciones actuales de los compuestos de micelio se limitan a los embalajes y a las aplicaciones de construcción limitadas. Sin embargo, se ha propuesto una amplia gama de aplicaciones para este tipo de material, incluidos los amortiguadores acústicos, superabsorbentes, papel, textiles y piezas de vehículos y electrónicas. Las investigaciones limitadas sobre compuestos de micelio detallan una variación significativa en el rendimiento y el potencial material atribuido a variables biológicas aún no exploradas. Esto, junto con la viabilidad recientemente demostrada en una variedad de aplicaciones, sugiere que se justifica una mayor investigación en esta área de investigación para liberar todo el potencial del micelio como material del futuro.

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: Esta revisión de las características de ingeniería y la creciente cinética de los compuestos a base de micelio nos da una idea de los factores y variables dentro del proceso de biofabricación de este material. Entendiendo el tipo de estructura que tiene cada cepa de hongo, la densidad de sus filamentos y las micro y macromoléculas existentes en su pared celular, nos arroja luces sobre su comportamiento mecánico, una vez finalizado el material. Es importante considerar que las condiciones de crecimiento dependen directamente del tipo de hongo y su comportamiento como tal. Por ejemplo, *Trametes versicolor* (trimítico) tiene una

mayor resistencia a la compresión que *Pleurotus ostreatus* (monomítico) en el mismo medio de crecimiento (cáñamo).

Es importante, que factores exógenos como las condiciones ambientales y la nutrición química influyen considerablemente en el crecimiento de los hongos, afectando a la duración de la tasa de crecimiento. Estos factores son especialmente relevantes para el tiempo de fabricación del material de micelio. Por otro lado, la optimización de la nutrición fúngica es un reto, ya que cada sustancia química que se encuentra en los organismos vivos, además de muchos materiales manufacturados e inorgánicos, puede apoyar potencialmente el crecimiento de hongos. Uno de los consejos encontrados en este artículo, es que los azúcares más complejos como la celulosa y la celobiosa inducen niveles más altos de actividad de la celulasa (enzima) que la glucosa sola (más de 10 veces más altos), lo que da lugar a una descomposición más rápida del sustrato. Es importante considerar estos factores químicos, ya que la nutrición química también afecta a la densidad del micelio dentro de la red hifal y con ello sus propiedades mecánicas.

Respecto a la quitina, uno de los componentes más importantes de la pared celular, los factores fisiológicos como el contenido de nutrientes del medio de crecimiento y la temperatura de crecimiento también pueden dar lugar a variaciones en los niveles relativos de este polímero en las paredes celulares de algunas especies. Si hablamos de resistencia, los compuestos a base de micelio son muy valorados debido a las combinaciones únicas de las propiedades materiales que exhiben cuando se combinan sus múltiples constituyentes, de hecho, la resistencia a la compresión de los compuestos de micelio varía mucho dependiendo de sus componentes. Dos compuestos de micelio usando el género *Ganoderma* mostraron resultados de resistencia a la compresión muy diferentes basados en diferentes materiales de sustrato. Si hablamos de las aplicaciones de los compuestos de micelio, en la industria de la construcción, la alta resistencia a la compresión (8,6-17,2 MPa) es el requisito físico clave de los ladrillos de construcción.

También se requiere una baja absorción de agua en caso de clima severo (20%) y moderado (25%). Esto cita (traducida) arroja muchas luces sobre a dónde pueden llegar futuras investigaciones: “Las propiedades de los materiales pueden mejorarse mediante el control de las materias primas, la cepa de micelio y la adición de aditivos naturales para promover la fuerza de adhesión en las interfaces” p. 252. Otra ventaja que presenta el micelio en este estudio, corresponde a su moldeabilidad, lo cual es relevante si hablamos de sus aplicaciones en arquitectura. Los materiales de micelio son tan versátiles geométricamente como los plásticos y son viables para la fabricación de productos con una geometría de diseño simple a compleja y única. El crecimiento del micelio digerirá las materias primas orgánicas independientemente de su disposición con una precisión notable.

Nombre de paper: Comparative Study of *Pleurotus ostreatus* Mushroom Grown on Modified PAN Nanofibers Mats
Autores: Lilia Sabantina, Franziska Kinzel, Thomas Hauser, Astrid Többer, Michaela Klöcker, Christoph Döpke, Robin Böttjer, Daria Wehlage, Anke Rattenholl and Andrea Ehrmann
Filiación: Facultad de Ingeniería y Matemáticas, Bielefeld University.
Año y medio de publicación: Nanomaterials, 9(3), 475. 2019

Resumen: La posibilidad de producir tejidos textiles a partir de nanofibras ha atraído el interés de varias áreas de la ciencia, y la morfología de la superficie es un factor importante para la adhesión y propagación de las células. La quitina de las paredes celulares del micelio de *Pleurotus ostreatus* lo convierte en un candidato prometedor para la estabilización mecánica de las esteras de nanofibras para filtros y otras aplicaciones. Además, se sabe que las nanofibras estabilizadas cambian su morfología al conectar las fibras en los puntos de cruce, lo que puede influir en la morfología del micelio. En este estudio, se llevaron a cabo experimentos de cultivo con *Pleurotus ostreatus* creciendo en esteras de nanofibras de poli(acrilonitrilo) (PAN) en presencia de sacarosa y Lutrol F68. El objetivo de este estudio era averiguar si las esteras de nanofibras de PAN modificadas son adecuadas para el crecimiento del micelio fúngico, para aumentar las tasas de crecimiento y para afectar a las morfologías de las fibras de micelio.

Los experimentos mostraron el mayor crecimiento de micelio para temperaturas ambientales de aproximadamente 25°C, lo que típicamente resultaba en que las placas de petri se cubrieran completamente con una fina capa de micelio después de 10 días. En primer lugar, se puede ver que en el agar de malta puro, el micelio crece más densamente en las nanofibras y sólo a regañadientes a través de los bordes de la estera de fibras. Especialmente en el caso del PAN/azúcar y del PAN/poloxámero, es claramente visible que la capa de micelio es más densa que en el caso del agar puro. Estas primeras imágenes sugieren que el crecimiento del micelio no sólo es posible en diferentes alfombras de nanofibras, sino que el rendimiento del material puede incluso incrementarse mediante sustratos electroscópicos, en comparación con el uso de agar puro como sustrato. Las alfombras de nanofibras subyacentes permiten la adaptación de la morfología del micelio, lo que a su vez permite modificar las propiedades mecánicas. Nuestros resultados muestran que el micelio de *Pleurotus ostreatus* crece en alfombras de nanofibras en diferentes morfologías, dependiendo del sustrato específico, y puede utilizarse para producir un compuesto de micelio fúngico y alfombras de nanofibras para aplicaciones biomédicas y biotecnológicas.

Por otro lado, los compuestos completos de PAN/micelio pueden ser estabilizados y carbonizados, permitiendo así la creación de compuestos de carbono con diferentes dimensiones de fibra. El experimento muestra que la estabilización y carbonización del micelio de la seta de ostra cultivada en la alfombra de nanofibras PAN es posible. De esta manera, se pueden realizar compuestos de carbono puro que consisten en fibras de micelio más gruesas y nanofibras más finas, abriendo el camino a los compuestos de carbono de estructuras fibrosas de diferentes diámetros. La estabilización y carbonización del micelio de *P. ostreatus*, que se mostró aquí por primera vez, influyó claramente en la morfología del micelio, lo que sugiere que se justifica la realización de más investigaciones sobre los parámetros del proceso.

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: En primer lugar, en este artículo se trabaja con la cepa de hongo de *Pleurotus ostreatus*, la misma

que se propone para el desarrollo de esta investigación. En este artículo se destaca la participación del micelio como estabilizador mecánico para las esteras de nanofibras, por lo que su enfoque se da en la estructura y morfología misma del hongo. Sumado a esto, las fibras de las esteras estabilizadas y los puntos de cruce entre ellas pueden llegar a ser capaces de cambiar la morfología de las fibras del micelio. Si bien, la presente investigación se enfoca en aplicaciones biomédicas y biotecnológicas, se presenta como información relevante, ya que toma el micelio de hongo como un elemento estabilizador de la alfombra de nanofibras. Esto nos indica que el micelio es capaz no sólo de adaptarse a la morfología de las fibras de las esteras, sino también de participar activamente en desarrollar una estructura más resistente.

Otro factor relevante de este artículo, es sobre lo que se demuestra a partir de los diferentes sustratos utilizados. En sus discusiones, se menciona que el tipo de sustrato influye en la densidad del micelio cultivado en él. Este resultado encaja con los hallazgos de la investigación, pues el micelio cultivado en alfombras de nanofibras recubiertas de sacarosa muestra una estructura diferente que el micelio cultivado en PAN puro o estabilizado. En sus resultados, también se menciona que los experimentos mostraron el mayor crecimiento de micelio para temperaturas ambientales de aproximadamente 25°C, lo que típicamente resultaba en que las placas de petri se cubrieran completamente con una fina capa de micelio después de 10 días. Es importante considerar estas condiciones de crecimiento para la investigación.

Finalmente, el paper presenta no solo la estabilización sino también la carbonización del micelio, como algo nuevo dentro de las investigaciones actuales. La estabilización y carbonización del micelio de *P. ostreatus*, que se mostró aquí por primera vez, influyó claramente en la morfología del micelio, lo que sugiere que se justifica la realización de más investigaciones sobre los parámetros del proceso. Se menciona entonces, que existe la posibilidad de crear compuestos de carbono con diferentes dimensiones de fibra, lo que significa diferentes desempeños mecánicos.

Nombre de paper: Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites

Autores: Freek V.W. Appels, Serena Camere, Maurizio Montalti, Elvin Karana, Kaspar M.B. Jansen, Jan Dijksterhuis, Pauline Krijgsheld, Han A.B. Wösten

Filiación: Utrecht University, Delft University of Technology, Design Academy Eindhoven.

Año y medio de publicación: Materials and Design, Vol: 161, 64–71, 2019

Resumen: Los compuestos a base de micelio son el resultado del crecimiento de hongos filamentosos en materiales orgánicos como los flujos de desechos agrícolas. Estos novedosos biomateriales representan una alternativa prometedora para el diseño de productos y de fabricación tanto en términos de procesos de fabricación sostenibles como de vida útil circular. Los estudios indican que, al igual que el micelio puro, las propiedades de los compuestos de micelio dependen del hongo, el sustrato, las condiciones de crecimiento y el procesamiento del material, así como de sus aditivos. El efecto del sustrato en el material compuesto de micelio se ilustra con las diferencias en las propiedades mecánicas.

Se evaluó el aspecto visual, la densidad, las propiedades mecánicas y el comportamiento de absorción de agua de una serie de compuestos a base de micelio que se obtuvieron variando el tipo de hongo (T. multicolor y P. ostreatus, el sustrato (paja de colza, aserrín de haya, residuos de algodón) y las condiciones de presión (no prensado, prensado en frío, prensado en caliente). En general, los materiales no prensados y prensados en frío tenían un aspecto blanquecino y aterciopelado con una estructura similar a la espuma. En contraste, los materiales prensados con calor eran compactos y tenían un aspecto marrón. La presión, pero no el tipo de sustrato u hongo, impactó en la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de los materiales del micelio. La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de los materiales prensados en caliente eran mayores en comparación con los correspondientes materiales prensados en frío y no prensados. No hubo una relación global entre la absorción de agua y el tipo de hongo, sustrato o condición de prensado utilizado para producir el material.

El prensado por calor dio como resultado un material compuesto de micelio con una densidad, módulo elástico y resistencia a la flexión similar a la de los materiales naturales como la madera y el corcho. Sobre la morfología, el sustrato de cada material generó diferencias en las apariencias de los materiales, mientras que con prensa de calor se asemejan a compuestos naturales como tableros de fibra. Sobre la densidad, el sustrato de aserrín resultó tener una densidad mayor que el algodón y la paja, y la densidad de estos últimos depende de su proceso. El prensado por calor también dio como resultado un grosor más uniforme dentro del mismo espécimen. Sobre las propiedades mecánicas, la variación del hongo o sustrato no afecta los resultados respecto a la fuerza de tracción y el módulo de elasticidad. Sobre la inmersión de agua, no hubo relación entre la cantidad de agua absorbida y el tipo de hongo, sustrato o proceso de prensado. Sobre el análisis termogravimétrico, el análisis mostró patrones de degradación similares para los materiales miceliales cultivados en paja de colza, algodón o aserrín de haya como sustrato. No se observan mayores variaciones respecto al tipo de hongo y prensado.

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: Este artículo es especialmente relevante, ya que trata sobre diferentes variables dentro del proceso de fabricación de compuestos a base de micelio. Tanto el tipo de hongo, el sustrato, las condiciones de crecimiento, procesamiento del material y sus aditivos, cum-

plen un rol en cuanto a las propiedades finales del material. Se experimentó con dos tipos de hongo, Pleurotus ostreatus y Trametes multicolor, mientras que se eligieron 3 sustratos; paja de colza, algodón y aserrín. Sumado a esto, una vez listas las muestras, se realizaron 3 procesos para cada una, sin prensar, prensado en frío y prensado en caliente.

Uno de los hallazgos importante de este artículo corresponde al prensado en caliente, pues este proceso ubica al material de micelio de hongo en la familia de materiales naturales, con características similares a la madera y el corcho en cuanto a su densidad y módulo de elasticidad de Young. Es interesante imaginar que con aplicaciones externas finales se pueden obtener resultados diferentes, independiente del sustrato o cepa de hongo. Sumado a esto, también se menciona que las diferencias entre sustrato y hongo no se manifiestan al momento de someter las muestras a pruebas de inmersión en agua, la fuerza a tracción y el módulo de Young. Esto es importante para considerar o para volver a probar en próximos experimentos.

Se destaca también la claridad de los procesos realizados, definiendo los métodos y análisis a realizar. Se realizaron múltiples pruebas mecánicas, de densidad, absorción de agua, inmersión en agua y aspecto visual, las cuáles nos brindan una idea de cómo se comportaría el material. En las conclusiones de artículo se observan comentarios respecto a las condiciones de crecimiento del micelio, pues se menciona que puede obtener una mayor mejora de los materiales de micelio promoviendo la colonización en la parte central del sustrato. Se demostró que la colonización por P. ostreatus y T. versicolor fue mucho mayor en las partes externas de los sustratos. La mejora de la colonización en la parte central de los materiales puede lograrse forzando el aire a través de la materia prima durante la colonización, aumentando así los niveles de oxígeno en el centro de la materia. Alternativamente, el tiempo de la colonización puede aumentar. Estos consejos son aplicables para futuras investigaciones.

Nombre de paper: Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties

Autores: Muhammad Haneef, Luca Ceseracciu, Claudio Canale, Ilker S. Bayer, JoséA. Heredia-Guerrero & Athanassia Athanassiou

Filiación: Istituto Italiano di Tecnologia (IIT)

Año y medio de publicación: Scientific Reports, 7(1), 41292, 2017

Resumen: Debido a las poluciones causados por los productos plásticos, la necesidad de materiales bio degradables es cada vez más crucial, sin embargo, estos todavía son costosos de producir o tienen un uso limitado. Es por esto que se busca una estrategia para poder modificar las propiedades de los compuestos durante su crecimiento. En este trabajo se presenta una nueva categoría de materiales compuestos naturales, fibrosos y autocrecientes, con propiedades físicas controladas, que pueden producirse en grandes cantidades y en amplias zonas, a partir del micelio, el cuerpo principal de los hongos. Se han cultivado cuidadosamente micelios de dos tipos de hongos comestibles, los hongos medicinales, Ganoderma lucidum y Pleurotus ostreatus, que se alimentan de dos biosustratos: celulosa y celulosa/potato-dextrosa, siendo el segundo más fácil de digerir por el micelio debido a la presencia de azúcares simples en su composición. Estas muestras son sometidas a pruebas de caracterización morfológica, mecánica, química e hidrodinámica, además de un análisis termogravimétrico.

Después de un tiempo de crecimiento específico, los micelios han sido procesados para detener su crecimiento. Dependiendo de su sustrato de alimentación, las estructuras fibrosas finales mostraron diferentes concentraciones relativas en polisacáridos, lípidos, proteínas y quitina. Esas diferencias se reflejan como alteraciones en la morfología y las propiedades mecánicas. No hubo diferencias significativas de diámetros en las fibras de ambas especies, lo que parece depender del sustrato con el cual son alimentadas. Los sustratos alimentados con PDB mostraron menor módulo de Young y mayor elongación comparados con los sustratos alimentados con celulosa, por lo tanto, la presencia de PDB hace que los materiales de micelio sean menos rígidos y más dúctiles. Por otro lado, todas las muestras presentaron altas temperaturas de degradación, lo que indica que son térmicamente estables. Todos los materiales fibrosos desarrollados eran hidrofóbicos con ángulos de contacto con el agua superiores a 120°C. La posibilidad de adaptar las propiedades de los materiales de micelio eligiendo adecuadamente sus sustratos de alimentación prepara el camino para su uso en varias aplicaciones a escala.

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: Los materiales fibrosos a base de micelio estudiados en este trabajo pueden ser una alternativa realista a los plásticos a base de petróleo. Los materiales desarrollados en base de micelio están compuestos de poliméricos naturales (quitina, celulosa, proteínas, etc.) que requieren un mínimo de energía para su producción (autocultivo). Sus características se pueden ajustar modificando los nutrientes. Por lo tanto, este trabajo puede allanar el camino para el autocrecimiento controlado de una variedad de funciones materiales de micelio en grandes cantidades a bajo costo.

Se destacan en este artículo, la importancia de los polímeros que participan en la creación del material fibroso, explorando todas las escalas del propio micelio, desde sus hifas, hasta la propia pared celular y sus proteínas, quitinas y glucanos (en mayor detalle en una de las imágenes principales.) Respecto a los gráficos, son importantes las comparaciones que se hacen para dar a conocer el desempeño

del material dependiendo de la cepa de hongo y el tipo de sustrato. Se destaca que la presencia del sustrato de celulosa pura, disminuye la elongación para ambas cepas, mientras que el valor del módulo de Young se mantiene para Ganoderma lucidum, independiente del sustrato (ver Figura 5).

La variedad de pruebas a las que fueron sometidas las muestras es relevante para la investigación, pues los gráficos pueden ser puntos de comparación. El estudio presenta un enfoque en un material de micelio más elástico, dúctil y menos rígido, por lo que se presenta como un caso opuesto en relación a mi investigación personal. Esto es particularmente enriquecedor, ya que se evita el uso de cepas y sustratos que derivan en materiales blandos (en este caso, ganoderma lucidum y la celulosa PBD). La mención de la quitina también juega un rol fundamental como estabilizador estructural en esta investigación, ya que se ubica en la pared celular de las hifas y se considera como polímero rígido.

Nombre de paper: Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam

Autores: Zhaohui (Joey) Yang, M.ASCE; Feng Zhang; Benjamin Still, S.M.ASCE; Maria White; and Philippe Amstislavski

Filiación: University of Alaska Anchorage

Año y medio de publicación: Journal of Materials in Civil Engineering, 2017

Resumen: Una alternativa renovable a los actuales materiales de aislamiento térmico convencional y de relleno ligero reduciría sustancialmente la carga ambiental y de salud pública de la construcción y promovería el desarrollo sostenible de la infraestructura. Los biocompuestos basados en fibras naturales, compuestos ecológicos de diversos biopolímeros, normalmente reforzados con fibras naturales, ofrecen alternativas renovables y biodegradables prometedoras a los materiales poliméricos basados en el petróleo.

Este documento presenta una innovadora bioespuma basada en micelio de hongos. Tres protocolos de mezcla diferentes con varios sustratos y materiales, incluyendo pulpa de madera, grano de mijo, salvado de trigo, una fibra natural, y sulfato de calcio, y dos condiciones de embalaje fueron probadas para producir muestras para la caracterización de propiedades físicas, térmicas y mecánicas. Se obtuvieron la densidad seca, la conductividad térmica, los módulos elásticos y la resistencia a la compresión. Se encontró que las muestras densamente empacadas siguiendo el Protocolo de Mezcla II tienen la mayor densidad, módulos elásticos, resistencia a la compresión y conductividad térmica comparable, y han cumplido o superado características similares de las espumas térmicas poliméricas convencionales, excepto la densidad seca. Los resultados demuestran que esta bioespuma ofrece un gran potencial de aplicación como material de aislamiento alternativo para la construcción de edificios e infraestructuras, en particular en las regiones frías, o como material de relleno ligero para aplicaciones de geotecnología.

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: Este paper parece fundamental, ya que trata sobre la posible aplicación del material de micelio como elemento aislante para la construcción e infraestructuras, especialmente en regiones frías. Se menciona la característica liviana del material en comparación con el agua, suelos y otros elementos usados en la industria de ingeniería civil. La bioespuma producida en este experimento ha cumplido y superado las características de espumas térmicas poliméricas convencionales, a excepción de su densidad seca. Las condiciones que este posible aislante presenta son ideales para proteger instalaciones y estructuras y aislarlas de la intemperie. Es importante mencionar, que en esta publicación se señala y se habla de la adición de fibras naturales y sus beneficios. La adición de estas no sólo implica un mejor desempeño en el módulo de elasticidad de Young, sino también en su comportamiento a la fuerza de compresión. Las fibras naturales, previenen además, el quiebre de la capa exterior del producto, la cual se forma en el período de crecimiento dentro del molde.

Otro aspecto a destacar es el desempeño anisotrópico del material, que tiene directa relación con la forma del molde y el proceso de incubación. El desempeño del material se dio de mejor forma en el sentido horizontal que vertical, frente a fuerzas de compresión y de corte. Esto se debe al moldeado y con ello la capa protectora que cubre el material por los lados en contacto con la bolsa de polipropileno (Protocolo de mezcla II). Esta piel quitinosa protegió la superficie circunferencial de las muestras y junto con las fibras naturales, se observa

que tiene una mejor resistencia a la compresión. El paper recomienda, además, que al momento de llenar los moldes, se haga de forma densa, con el doble del volumen, para obtener mejores rendimientos frente a las fuerzas de compresión. Una mayor densidad significa además una mayor rigidez frente a la elasticidad. En relación a los experimentos, es importante destacar, que los valores más altos de los módulos de Young y de cizallamiento sugieren una menor deformación elástica y un mejor comportamiento durante la instalación, mientras que una mayor resistencia a la compresión sugiere una menor posibilidad de daños cuando se aplica una gran carga. A pesar de que en este experimento se utiliza una cepa de hongo diferente, la información que ofrece es muy valiosa en relación a los procesos de moldeado, los tiempos de incubación y los resultados de las pruebas físico-mecánicas de las muestras.

Nombre de paper: The production process and compressive strength of Mycelium-based materials

Autores: Lelivelt, R. J. J., Lindner, G., Teuffel, P., & Lamers, H.

Filiación: Eindhoven University of Technology, The Netherlands

Año y medio de publicación: First International Conference on Bio-based Building Materials, June 2016, France.

Resumen: En la transición hacia un mundo en equilibrio dinámico con sus recursos naturales, el petróleo y todos los deben ser sustituidos por alternativas más renovables. Los materiales a base de micelio son renovables y pueden sustituir a los plásticos de origen fósil. Un material a base de micelio es un compuesto formado por un refuerzo o relleno natural, como las fibras de cáñamo y el micelio de un hongo. Un micelio es una red densa de filamentos finos, llamados hifas que crecen y se fusionan en un material continuo. El micelio actúa como una matriz que une el sustrato natural en un material ligero. El objetivo de este artículo es ofrecer una visión de producción de materiales a base de micelio y una indicación del rendimiento estructural de dichos materiales.

En la etapa de proceso, se aclara que una diferencia fundamental entre los hongos y otros organismos es que los hongos pueden descomponer la celulosa en glucosa. Esto significa que en entornos ricos en celulosa los hongos pueden crecer rápidamente, mientras que otros organismos no pueden hacerlo. Se menciona, además, recomendaciones durante el proceso de crecimiento; tales como un espacio oscuro, alta humedad, corrientes de aire y altos niveles de CO₂.

Para el experimento, se hicieron tres conjuntos de muestras. El primer conjunto se hizo con diferentes hongos, sustratos y métodos de esterilización. La combinación del primer conjunto que dio la mayor resistencia a la compresión se hizo en mayor número para el segundo y tercer conjunto. En los resultados visuales se observa un porcentaje de contaminación tanto de las muestras hervidas (11%) como las tratadas con peróxido de hidrógeno (33%). Todas las muestras mostraron un fuerte gradiente en la densidad del micelio a lo largo de la altura, con mayores concentraciones de micelio en las interfaces. La concentración también fue mayor en la superficie superior que en la inferior, debido a que se desarrolló un gradiente en la concentración de oxígeno con la mayor parte del oxígeno en la parte superior y la menor en la parte inferior. El calor que transmiten, también puede influir en la concentración de micelio.

En los resultados se observa que en cuanto a los sustratos, las esteras de cáñamo no tejidas mostraron la mejor compatibilidad con los micelios, ya que se pudo observar que el crecimiento era mucho más denso. Las muestras con C. Versicolor mostraron un crecimiento más denso que P. Ostreatus en todos los casos. Respecto a la compresión, tanto la rigidez como la parte superior de las probetas con esteras de cáñamo son mayores que las probetas con virutas de madera. Finalmente, los autores concluyen que la combinación de esteras de cáñamo no tejidas y la cepa C. versicolor mostraba el crecimiento micelial más denso. Esto coincide con los resultados de las pruebas de compresión, que mostraron la mayor resistencia y rigidez para estas muestras. La recarga del material dio lugar a un notable incremento de la rigidez y aumentó en gran medida la tensión al 10% de deformación.

Palabras claves: bio-basado, micelio, compuesto, renovable, sustentable, fibra natural, cáñamo

Relevancia para la investigación y posibilidades de desarrollo que propone: El paper es fundamental para la investigación, ya que no sólo propone métodos de crecimiento, sino que además compara los resultados de los tests de fuerza, densidad y fuerza específica a la compresión (como se observa en la tabla, imágenes principales). En la etapa de proceso, los autores sugieren dos recomendaciones importantes; ambas relacionadas al sustrato. La primera menciona lo práctico que puede llegar a ser utilizar materiales ricos en celulosa cuando se cultiva el hongo, ya que este lo degrada en celulosa y crece rápidamente, a diferencia de otros organismos. Otro consejo, hace referencia a los beneficios de fibras naturales y materiales similares a la madera. Estos compuestos de celulosa rígida tienen una alta resistencia incrustada en una matriz de lignina, a nivel molecular. Como el sustrato actuará como refuerzo del material, una alta resistencia a la tracción predice un alto rendimiento mecánico del compuesto en general. En el proceso se menciona también, que para mejorar las propiedades del material se puede añadir un recubrimiento como último paso.

Una recomendación nueva, se refiere la ventilación y el calor que genera el crecimiento del hongo en el material, ya que incide directamente en la concentración del micelio. El contacto con el oxígeno se ve beneficiado por una capa más gruesa en la superficie en contacto con el aire, por lo que se recomienda que haya ventilación en el ambiente de desarrollo del material, además de oscuridad. Una de las explicaciones que dan tras la diferencia de densidades de micelio en los bloques, es que el oxígeno estimula el crecimiento y el calor lo disuade, esto explicaría por qué el micelio es más denso en las interfaces y más denso en la parte superior. Si se aumenta el espesor del material, habrá un punto en el que el centro se vuelva demasiado caliente o anaeróbico para permitir cualquier crecimiento. Es decir, que hay un límite de espesor. Se destaca que además del espesor del material, la orientación de la fibra en los sustratos juega un rol importante al momento de someter al material a fuerzas de carga.

A partir de las inspecciones visuales, se concluye que la combinación de esteras de cáñamo no tejidas y la cepa C. versicolor mostraba el crecimiento micelial más denso. Esto coincide con los resultados de las pruebas de compresión, que mostraron la mayor resistencia y rigidez para estas muestras. La adición o ordenamiento del sustrato a partir de esteras de cáñamo como fibras naturales podría arrojar nuevas luces sobre el comportamiento físico-mecánico del material. En el paper también se hace mención de una recarga al material, la cual dio lugar a un notable incremento de la rigidez y aumentó en gran medida la tensión al 10% de deformación. En la investigación se mencionan además los tiempos y temperaturas de secado del material una vez finalizado el período de crecimiento. Esto corresponde a 125°C por 2 horas, para cada muestra.