



**USO DE MATERIAL A BASE DE MICELIO PARA  
LA ELABORACIÓN DE COMPONENTE PREFABRICADO QUE RESULTE COMPATIBLE CON  
CONSTRUCCIONES SUSTENTABLES**

Construcción de Centro de Interpretación y Turismo en Bahía Exploradores

Valentina Sofía Coloma Hohlberg





ESCUELA DE ARQUITECTURA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO  
Y ESTUDIOS URBANOS

**mase**

## **USO DE MATERIAL A BASE DE MICELIO PARA LA ELABORACIÓN DE COMPONENTE PREFABRICADO QUE RESULTE COMPATIBLE CON CONSTRUCCIONES SUSTENTABLES**

Construcción de Centro de Interpretación y Turismo en Bahía Exploradores

**Valentina Sofía Coloma Hohlberg**

Profesores Guía:  
Francisco Chateau  
Sebastián Rodríguez  
Ayudante:  
Matías Elliot

Tesis presentada para obtener el título de Arquitecto con  
Magíster en Arquitectura Sustentable y Energía  
de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Octubre, 2021  
Santiago, Chile



## Agradecimientos

por el apoyo incondicional de mis profesores y equipo de taller,

Francisco Chateau  
Sebastián Rodríguez

Taller de Investigación y Proyecto Biofabricación  
y dedicado con especial cariño a mi familia y amigos

---



## ABSTRACT

A partir de la investigación de materiales resistentes con base en micelio de hongo filamentos, se explora la posibilidad de construir un componente constructivo a escala arquitectónica. Lo anterior determina requerimientos específicos a resolver como la temperie, la resistencia estructural y la producción masiva.

Para abordar el problema se estudian los tableros a base de micelio de hongo, los cuales se propone sean utilizados en conjunto con otros materiales para conformar un componente. De esta forma se busca llegar, finalmente, a una solución constructiva para cubiertas en base a componentes prefabricados.

La solución constructiva de la que trata esta investigación formará parte de un proyecto de arquitectura el cual consiste en un Centro de Interpretación y Visitantes en Bahía Exploradores, Región de Aysén, Chile, instancia que servirá para validar su uso en la arquitectura.

### Palabras Clave

Tablero | Pliegue | Nervio | Unión | Micelio | Placa plegada | Origami | Componente Arquitectónico

---



## ÍNDICE

### Capítulo I: Formulación de la Investigación

- 1.1 Marco Teórico: introducción biomateriales de micelio
  - 1.1.1 Tableros a base de micelio
  - 1.1.2 Componentes arquitectónicos
  - 1.1.3 Economía circular
- 1.2 Definición del problema
- 1.3 Preguntas de investigación
- 1.4 Objetivos
  - 1.4.1 Objetivo general
  - 1.4.2 Objetivos específicos
- 1.5 Hipótesis
- 1.6 Metodología
  - 1.6.1 Revisión bibliográfica
  - 1.6.2 Trabajo Laboratorio
  - 1.6.3 Proyecto de arquitectura como experimento mental para validación

### Capítulo II: Contexto: Introducción a la Investigación (colectivo)

- 2.1 Antecedentes del Laboratorio de Biofabricación UC
- 2.2 Biofabricación
- 2.3 Fabricación con micelio y Laboratorio de Biofabricación UC

### Capítulo III: Procesos de fabricación y Estado del arte

- 3.1 Cultivo de materiales de micelio
  - 3.1.1 Proceso de fabricación
- 3.2 Propiedades físico - mecánicas materiales de micelio
- 3.3 Tableros de madera
- 3.4 Ventajas y desventajas
- 3.5 Ejemplo del mercado: Mycoboard
- 3.6 Laboratorio de Biofabricación
- 3.7 Comparación tableros de madera
- 3.8 Arquitectura y micelio: una primera aproximación
  - 3.8.1 Hy-FI
  - 3.8.2 Growing Pavilion

### Capítulo IV: Forma estructurante: materiales de micelio y aproximación al desarrollo de un componente constructivo

- 4.1 Placa plegada
- 4.2 Estructuras de Placa Plegada en madera
  - 4.2.2 Referentes Constructivos
    - Capilla St-Loup
    - Teatro Vidy-Lausanne
    - Prototipo Christopher Robeller y Yves Weinand
    - Thanhausen Music Rehearsal Hall

### Capítulo V: Componente material de micelio

- 5.1 Prestaciones y solicitudes
- 5.2 Sistema Unión de Placas
- 5.3 Panel como forma estructural (nervaduras)
- 5.4 Protección material
- 5.5 Propuesta componente constructivo
- 5.6 Capacidad estructural
- 5.7 Maqueta
- 5.8 Experimentación paneles micelio
  - 5.8.1 Cepa, Cultivo in Vitro
  - 5.8.2 Elección sustrato
  - 5.8.3 Producción material
  - 5.8.4 Moldeado
  - 5.8.5 Tratamientos post - cultivo
  - 5.8.6 Conclusiones Proceso de fabricación
- 5.9 Experimentación uniones entre tableros

### Capítulo VI: Proyecto de Arquitectura

- 6.1 Formulación del Proyecto
- 6.2 Lugar
  - 6.2.1 Valle Exploradores
  - 6.2.2 Emplazamiento
  - 6.2.3 Condiciones climáticas
- 6.3 Uso
  - 6.3.1 Descripción de los usos
  - 6.3.2 Usuarios
  - 6.3.3 Referentes Programáticos
    - Naturum Kosterhavet
    - Centro de Interpretación del Parque Natural Los Calares del Mundo y de la Sima
    - Centro de visitantes Naturum Tåkern
  - 6.3.4 Superficie programas
- 6.4 Forma
- 6.5 Materia

### Anexos

Planimetría proyecto

### Bibliografía

# 01 Formulación de la Investigación

Esta investigación trata de los materiales de micelio. El capítulo parte introduciendo el tema dando cuenta de en qué consisten y su utilización al día de hoy. Luego, el marco teórico se aborda desde tres aristas:

- 1) Su proceso de fabricación y diseño. De lo que se trata es de dar cuenta de cómo diferentes procesos logran distintos tipos de materiales; cómo ha sido utilizado en proyectos de arquitectura y diseño; y cuáles usos se le han dado. De esta manera, se ilustrará acerca de qué tipo de proyectos y formas se pueden lograr con este material. En específico, se estudian tableros de micelio que buscan maximizar la capacidad estructural del material.
- 2) Su utilización conjunta con otros materiales que le den mayor capacidad estructural al micelio.
- 3) Su condición sustentable dentro de la industria de la construcción y como su utilización puede traer repercusiones positivas para el medio ambiente.

Se establece definición del problema, preguntas de investigación, objetivos, hipótesis y metodologías.

## 1.1 Marco Teórico: introducción biomateriales de micelio

Los materiales bio-basados compuestos por micelio de hongo son un tipo de material nuevo que está siendo estudiado y aplicado cada vez más en la industria.

Las necesidades de avanzar hacia materiales más sustentables, además de su elevada moldeabilidad, ha hecho al material crecer en popularidad y atraer el interés de distintas disciplinas. Diseñadores y arquitectos han comenzado a explorar el uso de micelio en productos de diseño, moda y materiales de arquitectura (cuero sintético, utensilios de cocina, artículos de embalaje, muebles, comida, paneles de muro y cielos).

El micelio compone la parte vegetativa del hongo, la cual está formada por una red de filamentos que, junto con un sustrato lignocelulósico, constituye un biomaterial. Para la fabricación de este tipo de materiales se deja crecer el micelio en un sustrato, de manera que el hongo vaya colonizándolo, formándose así, el biomaterial. Los materiales a base de micelio poseen bajos costos, capacidad de autofabricación y sostenibilidad ambiental. Aquello da cuenta de su gran potencial para convertirse en un material clave en un futuro relativamente próximo, pues la preservación del medioambiente se ha ido transformando en una tarea urgente a asumir por la humanidad.

Al comparar la producción de este material con los más comunes utilizados en construcción (acero, ladrillos y hormigón) es muy notoria la diferencia de energía que conlleva producirlos. Cuando hablamos de edificios o viviendas de bajo coste energético, solo se considera un menor costo durante la ocupación del edificio, pero es importante considerar la energía necesaria

para la fabricación del edificio la cual, actualmente, resulta muy alta.

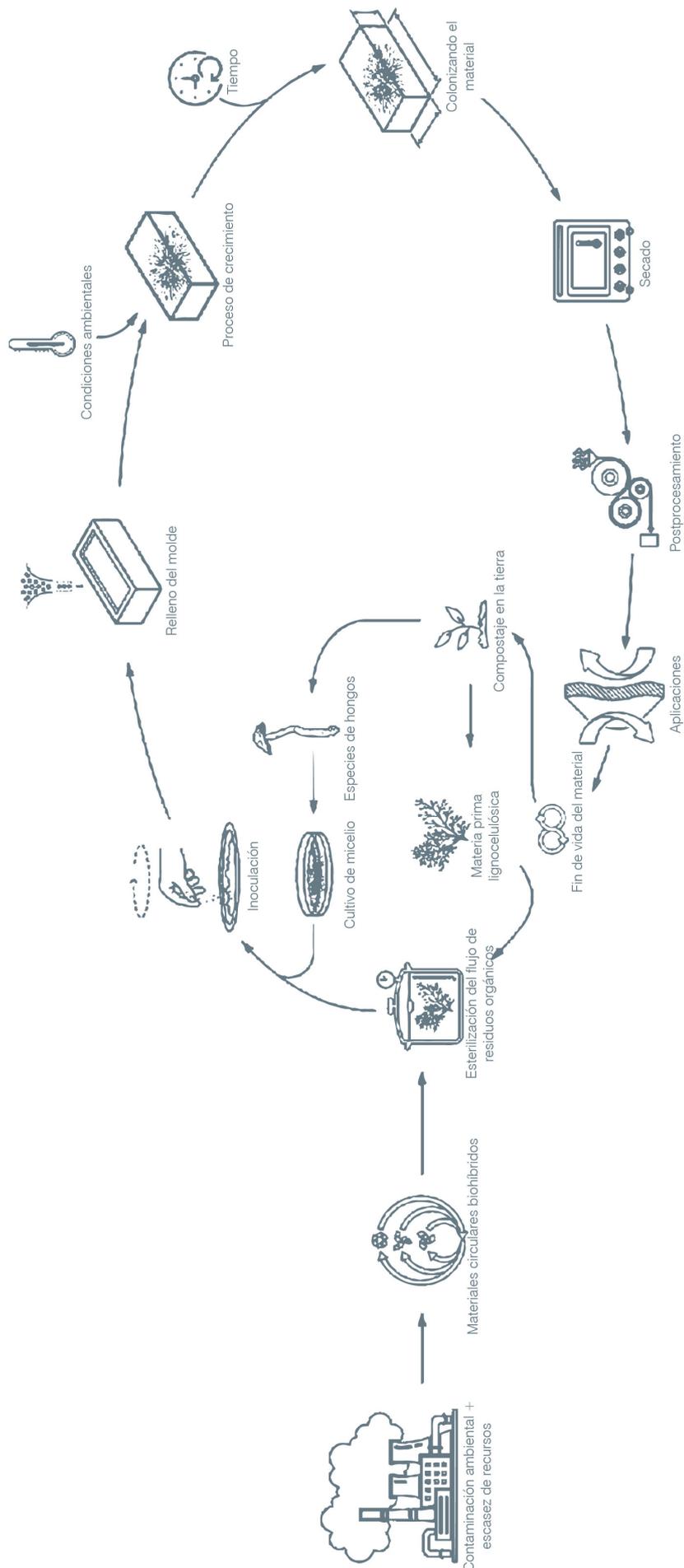
Un punto muy interesante en la bio fabricación de materiales a base de micelio es el aprovechamiento de desechos agrícolas, los cuales sirven como sustrato del micelio para generar el material. Actualmente gran parte de estos desechos agrícolas se queman generando dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero perjudiciales para el medioambiente. Es por esto que la utilización de estos desechos para la fabricación de materiales orgánicos resulta particularmente beneficiosa: ayuda a reducir desechos y genera materiales de construcción de baja energía contenida, lo que es sustentable para la vida en el planeta. En pocas palabras, es una bio fabricación de baja energía y de reciclaje de desechos, ambos al mismo tiempo. Otro punto que nos hace pensar en este como el material ecológico del futuro es su biodegradabilidad. Pensando que a largo plazo no es un material que terminará como desecho contaminante.<sup>1</sup>

### 1.1.1 Tableros a base de micelio

En la fabricación de tableros de madera de densidad media como MDF o tableros de partículas se utilizan colas o resinas que contienen formaldehído y otros adhesivos derivados del petróleo. Dichos adhesivos, además de contaminantes, resultan cada vez más escasos. Frente a esto se hace necesaria una transición hacia métodos de construcción circulares con producción de materiales a partir de recursos renovables. Los materiales a base de micelio surgen como una solución a este problema produciéndose mediante el cultivo de micelio sobre sustratos orgánicos.<sup>2</sup> . A partir de un sustrato lignoceluló-

<sup>1</sup> Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2019). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review.

<sup>2</sup> Elsacker, E., Vandelook, S., Van Wylick, A., Ruytinx,



**Figura 1.** Proceso de producción circular de materiales de micelio (Elsacker E. , y otros, 2020)

sico (formado por lignina y celulosa) como viruta de madera, cáscara de nuez, entre otros, el micelio de hongo lo descompone, colonizando el sustrato y funcionando como un aglomerante natural que es capaz de crear un nuevo material. Si esto se combina con un prensado en calor o frío se obtiene un tablero de micelio con distintas características según los procesos, hongos y sustratos que se utilicen.

### 1.1.2 Componentes arquitectónicos

Como señala Ignacio Paricio,<sup>3</sup> a principios del siglo XX se produce un cambio en la manera de construir. Concretamente se pasa de construcciones homogéneas a construcciones heterogéneas donde los componentes son mono funcionales o muy especializados. Así el problema de las uniones pasa a ser crítico y la durabilidad del conjunto disminuye.<sup>4</sup> Esto crea la posibilidad de generar piezas fabricadas de diferentes materiales con distintas prestaciones que permiten desarrollar componentes complejos.

“El diseño integrado de elementos constructivos que lleva a la creación de piezas capaces de responder a múltiples funciones simultáneamente, lleva inevitablemente a la emergencia de formas complejas. Cuando el objetivo de una unidad estructural va más allá de garantizar la estabilidad de un edificio, su diseño requiere de la intervención de técnicos especialistas en múltiples disciplinas y el resultado final es, en general, más valioso que la suma de distintas funciones que es capaz de cumplir”.<sup>5</sup>

---

J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. Konstantinos G Moustakas.

**3** Paricio, I. (1996). *La Construcción de la Arquitectura*. Tomo 2: Los elementos. Barcelona: ITC.

**4** Capeluto, M., Turull Torres, M., & Galarza, F. (2014). *La materialidad del Patrimonio Moderno. Construcción, degradación y conservación*. Instituto de Investigación en Arte y Arquitectura Universidad del Salvador. (Capeluto, Turull Torres, & Galarza, 2014)

**5** Fontana Cabezas, J. (2012). *El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. Universitat

### 1.1.3 Economía Circular

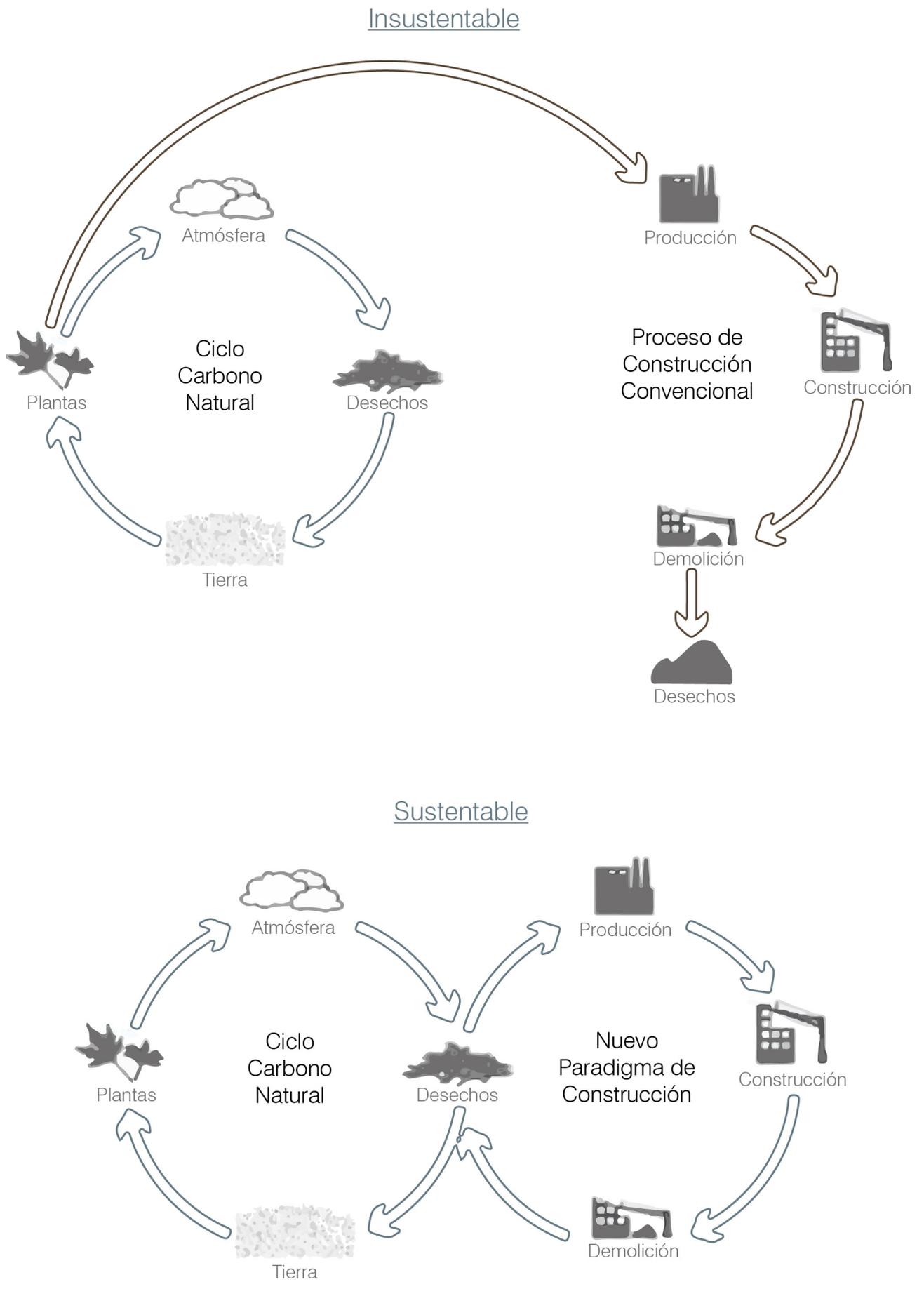
La construcción con biomateriales, tanto en su proceso de fabricación como al término de su vida útil, será un aporte importante para reducir la huella de carbono en el ámbito de la construcción y arquitectura, aportando en la lucha contra el cambio climático, tal como se observa en la figura 2.

Como se plantea Salvador Climent en el trabajo “Economía circular aplicada a la arquitectura”: “Hoy en día, la mejor manera de actuar de forma sostenible es aplicando el concepto de la economía circular a la arquitectura (...) Ya no sirve simplemente con reciclar o usar materiales reciclados. La idea es ir más allá y rediseñar las cosas teniendo en cuenta que, al finalizar su vida útil, puedan ser desmontadas o despiezadas y aprovechadas en un futuro. El problema es que se siguen construyendo edificios según unas necesidades para un tiempo indefinido, bonitos y funcionales en el contexto actual, pero no se suele pensar qué será del mismo durante toda su vida útil, si será habitado o no, o si cumplirá siempre la misma función. También se usan materiales con una caducidad diferente (madera, acero, hormigón, plásticos, etc.) sin tener en cuenta si con el paso de los años el edificio tendrá que ser rehabilitado, rediseñado o demolido y, en caso de serlo, cómo sería ese proceso. Surge, entonces, la pregunta: ¿sería factible diseñar un edificio en el cual todos los componentes que lo forman pudieran ser reutilizados, reciclados o refabricados al concluir su vida útil?”<sup>6</sup>

---

d’Alacant Escuela Politécnica Superior.

**6** Climent Salvador, A. (n.d.). *Economía Circular aplicada a la arquitectura*. Universitat Politècnica de València.



**Figura 2.** Adaptación imagen David Benjamin, The Living architecture lab, New York, NY, USA: Desvío temporal del ciclo del carbono natural para hacer un edificio y luego devolverlo al ciclo.

## 1.2 Definición del problema

Este proyecto de investigación aborda el problema que representa construir de manera deferente con el medio ambiente, en un contexto paradójico en que los materiales a los cuales más se recurre son contaminantes, pero presentan ventajas estructurales y de durabilidad. El lugar escogido como relevante para esta investigación es el Parque Nacional Laguna San Rafael, situado en el sur de Chile, el cual se prevé que en un mediano plazo requerirá un desarrollo de la casi inexistente infraestructura para los visitantes, y que, a la vez, es reconocido como reserva ecológica que requerimos preservar. La estrategia para hacer frente al desafío señalado supone investigar las posibilidades que ofrezca un material de construcción que sea no contaminante tanto en su proceso de fabricación como en el de su degradación, de manera de no generar daño al ecosistema donde es utilizado. Más concretamente, se ha elegido la utilización de tableros a base de micelio de hongo, material que hasta la fecha se muestra como muy amigable con el medio ambiente, pero con insuficiencias desde un punto de vista estructural y de durabilidad; ello en términos de ser utilizado en un componente arquitectónico que permita la construcción de techos en proyectos arquitectónicos funcionando tanto estructuralmente como aislante.

El mayor problema que afecta a este material para ser usado en construcción se debe a sus propiedades físicas y mecánicas las cuales, en comparación con materiales de construcción convencionales, funcionan peor estructuralmente. Su falta de capacidad de compresión y tracción hacen que todavía no haya sido reconocido como un material estructural competitivo ni como variante realista frente a los usuales. Sin embargo, al ser un material más bien nuevo,

todavía queda mucha investigación en pro de mejorar sus capacidades físicas y mecánicas. Así, es de esperar que, en el mediano plazo, sea una opción competitiva, debido al aporte medioambiental que significaría en la industria de construcción.

La aplicabilidad y practicidad de los materiales basados en micelio son en gran parte inexplorados y los estudios individuales utilizan una amplia gama de diferentes enfoques experimentales y procedimientos no estandarizados.

Teniendo esta idea en mente y considerando la incapacidad del material de micelio para funcionar estructuralmente, se propone desarrollar un componente constructivo donde los tableros de micelio cumplan un rol aislante y que logre funcionar de manera estructural al estar en conjunto con otros materiales que asuman distintos requerimientos.

Para la implementación del componente se toma un sistema constructivo y se adapta de manera que pueda ser utilizado en la cubierta.

Por otra parte, se propone un proyecto de arquitectura que cumpla con los estándares de economía circular, pensando en un diseño de ensamblaje y desarmado fácil, donde las medidas del edificio sean pensadas para producir la menor cantidad de desecho posibles. Se tiene en consideración que posee una vida útil donde se permite que el edificio se desarme reutilizándose algunas de sus partes y degradando el material de micelio en el mismo lugar.

### 1.3 Preguntas de Investigación

- ¿Cómo se construyen con materiales basados en micelio, estructuras arquitectónicas habitables de carácter semi permanente y que al cumplir su ciclo se degraden en el mismo lugar?
- ¿Cómo debe trabajarse el material de micelio, en términos de hacer posible prefabricarlo en paneles utilizables en construcciones y que sea apto para soportar condiciones climáticas adversas?
- ¿Qué sistema constructivo permitirá crear un proyecto arquitectónico donde el material de micelio logre funcionar de manera estructural y como aislante?
- ¿Cómo deben ser las uniones entre paneles de micelio para lograr cubrir grandes luces?

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo General

Como principal objetivo dentro de la presente investigación se propone diseñar un componente arquitectónico compuesto que, mediante la adaptación de un sistema constructivo, pueda proveer una alternativa para la construcción de cubiertas arquitectónicas.

De esta manera, se busca lograr un componente que funcione estructuralmente, siendo deferente con el medio ambiente, no contaminante en su proceso de fabricación y degradable una vez que haya cumplido su ciclo de vida.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Organizar y evaluar los diferentes materiales producidos en el Laboratorio de Biofabricación UC y establecer sus potencialidades para este tipo de componente.
- Evaluar el desempeño estructural de la construcción con componentes de micelio en un Centro de información y de visitantes de un parque nacional.

- Desarrollar un proyecto de arquitectura como mecanismo de validación inicial para la propuesta de componente constructivo.

### 1.5 Hipótesis

Considerando el estado del arte actual en cuanto al desarrollo de los materiales, la hipótesis de este trabajo es si resultaría posible desarrollar un componente constructivo a base de paneles prensados de micelio para ser utilizados en cubierta. Éste se puede concebir como un material compuesto, al cual, al agregarle otros elementos como membranas, laminas o tensores, puede adquirir otras capacidades, como ser resistente a la lluvia y autoportante.

En el desarrollo de este componente constructivo el micelio cumpliría un rol estructural y aislante, mientras que los otros requerimientos, como la resistencia a factores externos, serían asumidas por otros materiales.

### 1.6 Metodologías

El trabajo de investigación se aborda metodológicamente desde tres ámbitos: revisión bibliográfica (donde se estudia por una parte la ciencia de los materiales y por otra la forma arquitectónica), trabajo de laboratorio y proyecto de arquitectura (que valide la investigación).

#### 1.6.1 Revisión bibliográfica

En la búsqueda de los mejores procesos de fabricación y las consideraciones a tener a la hora de crear un material basado en micelio, se estudia, por un lado, el paper "A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites." Este paper funciona como una especie de índice para entrar a otras investigaciones, haciendo una revisión detallada de los datos existentes hasta el 2020 sobre la composición de biomateriales de micelio y variables de procesos de fabricación, de manera

de proporcionar un marco integral del proceso de producción.

Además, se revisa el paper científico “Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites,” donde se establecen distintas propiedades físico-mecánicas de distintos tipos de tableros en base a micelio (dónde se varía tipo de cepa, sustrato y tipo de prensado). Luego se comparan estas propiedades con tableros de madera MDF y OSB, de manera de comparar sus propiedades físicas con materiales conocidos.

Por otro lado, se hace un estudio analítico de dos proyectos de arquitectura temporales con materiales de micelio, lo cual nos permite tomar ciertos supuestos de cómo funciona el material y qué tipo de solicitaciones es capaz de resistir, funcionando como referencias a la hora de proponer un sistema constructivo que funcione con este material.

Como parte de la metodología en el desarrollo del componente se hace una revisión bibliográfica de proyectos de arquitectura que, a partir de la forma, logren rigidizar la estructura de manera de no exigirle muchos esfuerzos a los tableros de micelio. En específico, se estudian las placas plegadas.

Así se investiga el material, pero también se investiga cómo el material puede arribar a una forma arquitectónica, que es lo que finalmente lleva a la idea del componente y de una solución constructiva para cubiertas.

### **1.6.2 Trabajo Laboratorio**

En el trabajo realizado en el Laboratorio UC se desarrollan biomateriales de manera de conocer el proceso de biofabricación y cuáles son las dificultades y consideraciones para tomar en cuenta a la hora de cultivar el material.

Esta metodología de investigación toma como supuestos los conocimientos ya obtenidos en el Laboratorio de Biofabricación UC, en cuanto a la creación de un material de hongo resistente.

### **1.6.3 Proyecto de arquitectura como experimento mental para validación**

Finalmente se desarrolla un proyecto de arquitectura como forma de validación del componente constructivo desarrollado en la investigación.

## 02 Contexto: Introducción a la Investigación

Este capítulo de la tesis se realizó de manera colectiva en conjunto con el Taller de Investigación y el Laboratorio de Biofabricación UC / 2020 – 2021

### Autores

Benjamín Aedo Venegas

Felipe Aragón Godoy

Paulina Avendaño Salgado

Valentina Coloma Hohlberg

Luciano Cuq Sepúlveda

María Jesús Fernández Hernández

Cristóbal Montecinos Narea

Sofía Orellana Von Frey

Carolina Silva Pino

### Investigadores y académicos responsables:

Sebastián Rodríguez Jara

Matías Elliot Oyarce

Francisco Chateau Gannon

## 2.1 Antecedentes del Laboratorio de Biofabricación UC

El presente trabajo se inscribe en la investigación de materiales a base de micelio desarrollada por el equipo del laboratorio de Biofabricación UC.

Iniciada en el año 2017, sus objetivos son desarrollar investigación aplicada en torno a proceso de fabricación que involucren 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.

## 2.2 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  $\text{CaCO}_3$  (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 recursos 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)

## 2.3 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 a base de micelio y sustratos lignocelulósicos con un uso útil para componentes



Fotografía de inoculación en placa en cabina de flujo descendente



Fotografía de bolsas de spawn, a la izquierda recién inoculado, a la derecha completamente infestado.



Fotografía del proceso de pausterización



Fotografía del sustrato pasteurizado destilando.



Fotografía bolsas de sustrato perforado



Fotografía del interior de cámara de cultivos en Hongos de Chile



Fotografía del proceso de moldeado



Fotografía de un bloque de micelio recién sacado del molde

**Figura 3.** Fotografías tomadas de trabajo investigación de Elliot, M. (2020). Biomateriales en base a Micelio. Arquitectura en función de la biofabricación de materiales para la construcción. Escuela Arquitectura UC.

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

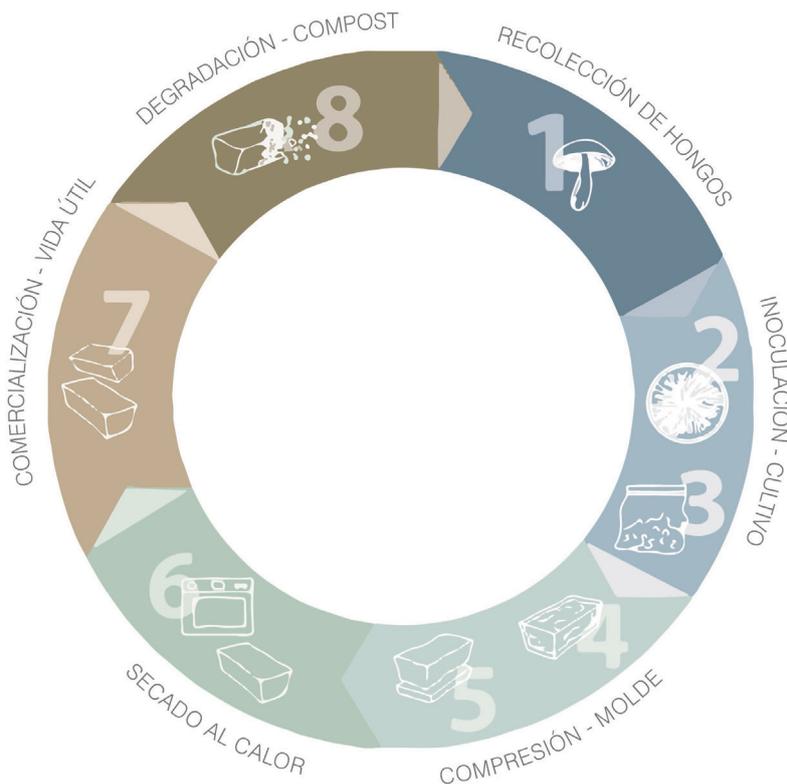
El cultivo, testeo y prototipado involucró dos especies de hongos lignocelulolíticos: *Trametes Versicolor* y *Pleurotus Ostreatus*, los cuales fueron colectados en el parque Karukinka y la industria agropecuaria, respectivamente. La secuencia completa de cultivo y fabricación se llevó a cabo haciendo 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/m<sup>3</sup>; 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)

## 03 Procesos de Fabricación y Estado del Arte

En este capítulo se hace una revisión de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de micelio en la literatura. Se establecen ventajas y desventajas de estos materiales para poder compararlos luego con tableros de madera y materiales fabricados en el Laboratorio de Bio-fabricación UC. Se detalla el proceso de fabricación del material paso a paso del material en el laboratorio y por último se revisan proyectos de arquitectura con micelios existentes para estudiar sus uniones y capacidades estructurales.



**Figura 4.** Diagrama ciclo circular de materiales de micelio. Elaboración Coloma, Da Rocha, Fernández, Silva, 2020.

Como ya se mencionó con anterioridad, el micelio es una red de hifas entrelazadas en forma de hilo, que constituyen la parte vegetativa de los hongos. Una “hifa” es la unidad de desarrollo más básica de hongos filamentosos. (figura 5)

El hongo a través de las hifas por las cuales está compuesto el micelio segrega enzimas capaces de descomponer polímeros en monómeros.

En el proceso de biofabricación de un material a base de micelio con un sustrato lignocelulósico, el micelio degrada y coloniza el sustrato orgánico, utilizando los productos de degradación como elementos de alimentación para extender sus hifas desde la punta, mientras ramifica nuevas hifas y las fusionan para formar una red más densa.<sup>7</sup>

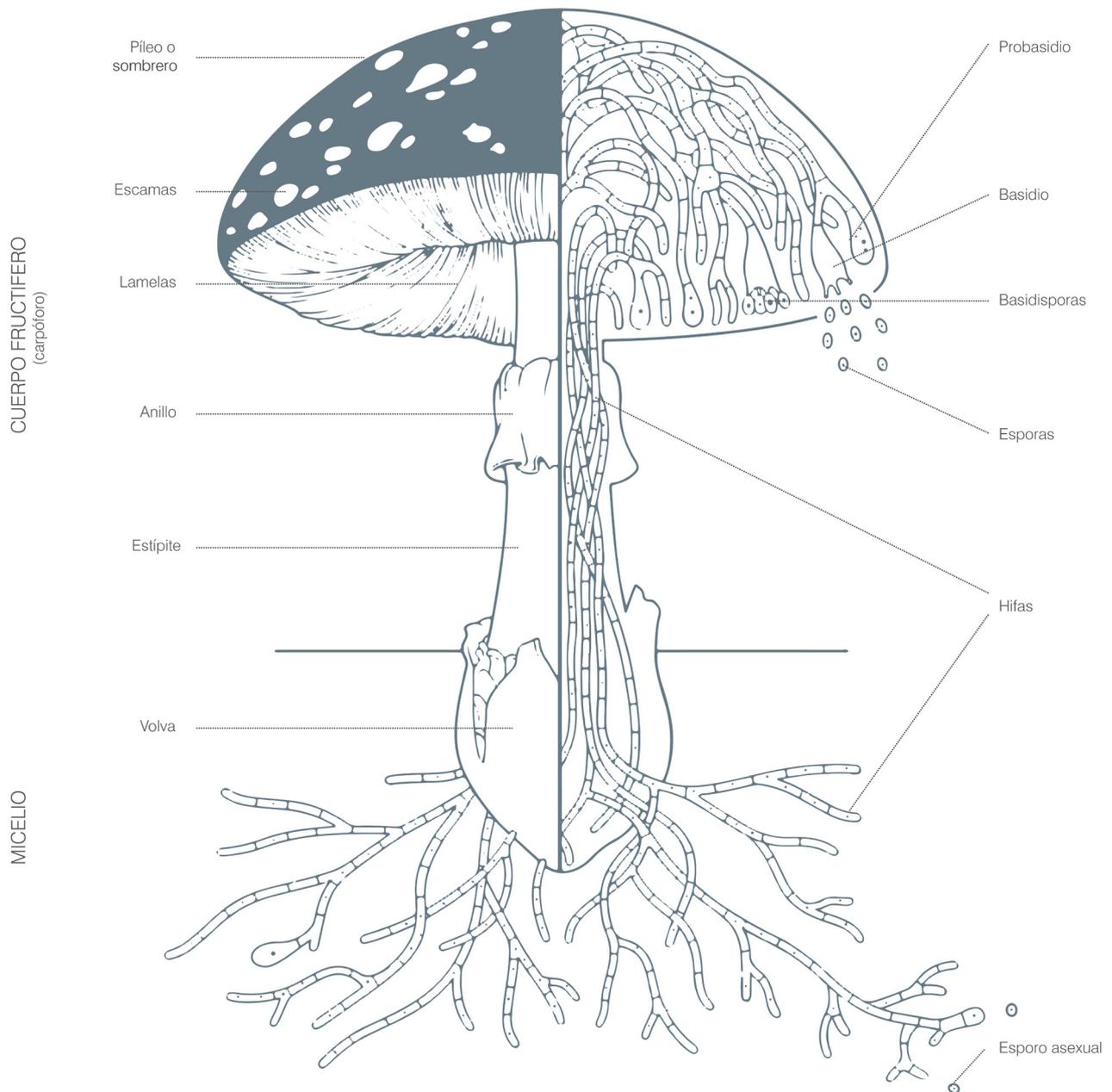
<sup>7</sup> Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., &

Para que el micelio pueda hacer una correcta degradación y colonización del sustrato es necesario que este último sea rico en nutrientes, ya que de esta manera el micelio “aglutinará” de mejor manera todos los monómeros y polímeros descompuestos generando un material con mejor capacidad de tracción y flexión. Además de esto, la compresión del material tanto en frío como en calor se asocian a una mejoría en la capacidad de tracción y flexión.

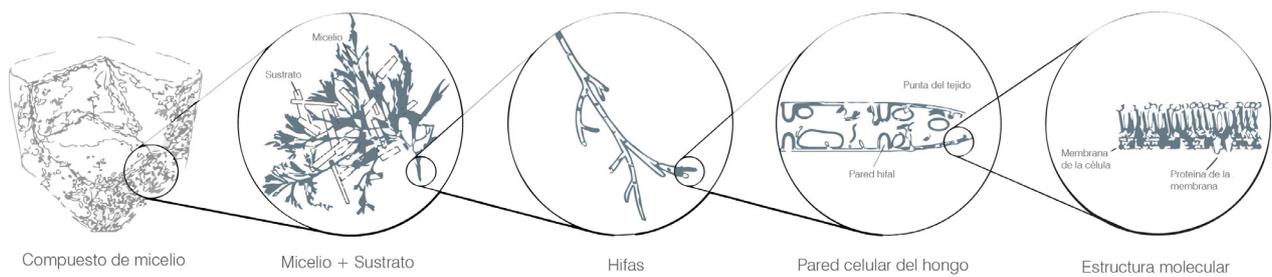
Los sustratos lignocelulósicos se pueden obtener de desechos de la agricultura como trigo, paja, cáscara de nuez, cáscara de arroz, grano de trigo, rastrojo de maíz, astillas de madera u otras fibras naturales como el yute, lino, cáñamo, arpillera, etc.<sup>8</sup>

John, S. (2019). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review.

<sup>8</sup> Vidholdová, Z., Kormúthová, D., Izdinský, J., Lagana, R.



**Figura 5.** Adaptación imagen de Franco Nieri: Anatomía del cuerpo fructífero o esporocarpio del hongo



**Figura 6.** Representación esquemática de los materiales de micelio a diferentes escalas (Elsacker E. , y otros, 2020)

Dentro de los materiales que se pueden fabricar a partir de micelio se encuentran los tableros. Estos se fabrican a partir de sustrato lignocelulósico y micelio de hongo, el cual luego es sometido a presión para obtener así un tablero. Dado que los materiales con micelio son un material nuevo y no existe experiencia al respecto en el ámbito de la construcción, una buena forma de poder aproximarse a su caracterización es establecer semejanzas con materiales conocidos como espumas, en el caso de no estar sometidos a presión, y a tableros de madera, cuando son sometidos a presión en calor. Por consiguiente, podemos afirmar que el material posee, de esta forma, potencial para ir reemplazando los tableros de partículas de madera utilizados hoy en día como lo son el OSB, MDF, entre otros.

### 3.1 Cultivo de materiales de micelio

En el curso adscrito a esta investigación, Laboratorio de Biofabricación de la P. Universidad Católica de Chile, se realizaron cultivos de materiales a base de micelio de manera de conocer su proceso de fabricación y familiarizarse con el proceso.

En la figura 4 se ve un diagrama que se desarrolló de manera de entender el proceso circular que poseen los materiales a base de micelio.

#### 3.1.1 Proceso de fabricación

Resumiendo lo mostrado en la figura 4 se detallan 7 pasos dentro del proceso de fabricación de biomateriales de micelio:

1. Se inicia por la recolección de un hongo del cual se obtienen las esporas.
2. Estas son pasadas a una placa Petri con un medio fácil de sintetizar por el hongo, de manera que crezca el micelio.
3. El micelio se deja crecer en un sustrato lignocelulósico para que vaya extendiendo sus hifas y colonice el sustrato.
4. Una vez obtenido el material (sustrato colonizado por el micelio) se pasa a un molde, para darle la forma deseada al material. (En el proceso de moldeado se puede prensar)
5. Una vez que el material está listo (hifas ramificadas en todo el molde) se puede pasar al proceso de secado del material, dónde mediante calor se mata el hongo para que no siga creciendo.
6. El material ya secado y con procesos post cultivos como pueden ser una colada de cal, está listo para ser utilizado
7. Cómo última parte del proceso se considera la degradación del material una vez que cumplió su vida útil. De esta manera, el proceso es circular.

---

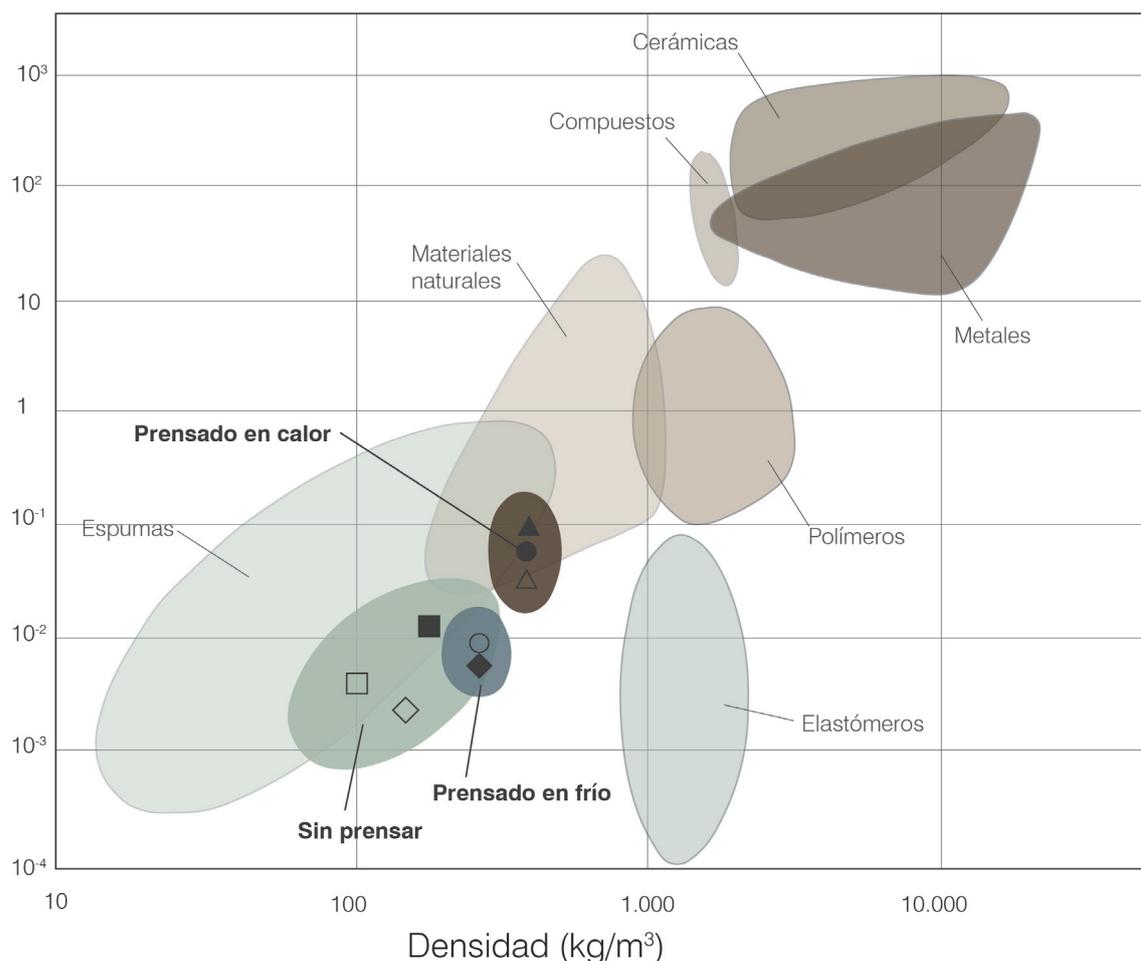
(2009). Compressive Resistance of the mycelium composite. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW.

MATERIAL	HONGO	SUSTRATO	PRENSADO	
□	TRN	T. Multicolor	Paja de colza	Sin prensar
■	TBN	T. Multicolor	Aserrín de haya	Sin prensar
●	TRH	T. Multicolor	Paja de colza	Prensado en calor
◇	PRN	P. Ostreatus	Paja de colza	Sin prensar
○	PRC	P. Ostreatus	Paja de colza	Prensado en frío
▲	PRH	P. Ostreatus	Paja de colza	Prensado en calor
	PCN	P. Ostreatus	Residuos de algodón	Sin prensar
◆	PCN	P. Ostreatus	Residuos de algodón	Prensado en frío
△	PCH	P. Ostreatus	Residuos de algodón	Prensado en calor



**Figura 7.** Tabla de materiales probados en el estudio. Appels, F., Karana, E., Jansen K.M.B., Camere, S., Montalti, M., Dijksterhuis, J., . . . H.A.B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64-71.

**Figura 8.** Materiales resultantes del crecimiento de *T. multicolor* en aserrín (TBN) y paja con (TRH) y sin (TRN) prensado en calor y crecimiento de *P. ostreatus* en algodón con prensado en calor (PCH), prensado en frío (PCC) y sin prensar (PCN) y sobre paja con prensado en calor (PRH), prensado en frío (PRC) y sin prensado (PRN).



**Figura 9.** Gráfico del módulo de Young de los materiales (GPa) vs. densidad ( $\text{kg/m}^3$ ). Appels, F., Karana, E., Jansen K.M.B., Camere, S., Montalti, M., Dijksterhuis, J., . . . H.A.B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64-71.

### 3.2 Propiedades físico-mecánicas materiales de micelio

Los principales factores que inciden en las propiedades finales del material como su densidad, resistencia y módulo de Young, son la cepa de hongo escogida, el sustrato y el método de fabricación.

Se han hecho diversos estudios del comportamiento de materiales a base de micelio. Varios de estos asemejan las características físicas y mecánicas a materiales como la espuma y en ciertos casos cuando son sometidos a compresiones en calor pueden llegar a asemejarse a tableros de madera no estructurales (ver figura 9). Una vez que el micelio ya ha colonizado el sustrato lignocelulósico y le es aplicado prensado en calor, el micelio se ‘derrite’ durante el proceso de compresión para luego penetrar y formar redes apretadas de cohesión entre el hongo y el sustrato colonizado, mejorando así, la unión y dando como resultado un biocompuesto más fuerte.<sup>9</sup>

En el paper “Fabrication factors influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites”, se hace un estudio donde se comparan 9 tipos de compuestos de micelio, variando el tipo de hongo (*Pleurotus Ostreatus* y *Trametes Versicolor*), el tipo de sustrato (paja, aserrín de haya y residuos de algodón) y las condiciones de prensado (no prensado, prensado en frío y prensado en calor) como se muestra en la figura 7 y 8.

Una vez realizadas las muestras, se le realizaron pruebas de densidad, fuerza de tracción, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, entre otras.

Al hacer las pruebas se observó que los materiales sometidos a presión en calor presentaban una densidad, módulo elástico y resistencia a la flexión similar a la de materiales como madera o corcho. Esto puede observarse en la figura 9.

<sup>9</sup> Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M., & Amstislavski, P. (2017). Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofam. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

### 3.3 Tableros de madera

Al analizar materiales utilizados en la industria de construcción que presentan propiedades similares a tableros de micelio nos encontramos con la madera contrachapada como los tableros de densidad media y tableros de partículas utilizados en la industria consisten en partículas de madera unidas por un adhesivo químico como el urea-formaldehído y fenol-formaldehído que permiten mejorar la fuerza de unión interna entre las partículas.

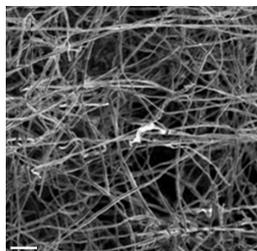
La mayoría de los adhesivos sintéticos son compuestos volátiles lo que significa que poseen el potencial de liberar formaldehído al medio ambiente lentamente, la exposición prolongada al gas formaldehído.

Según los informes de la Agencia de Protección Ambiental, el formaldehído que liberan los tableros constituye un problema de salud y exige

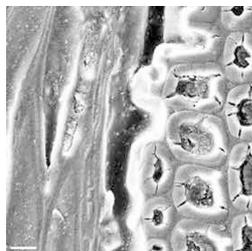
legislaciones sobre las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) en la producción de madera contrachapada. Debido a esto, se está produciendo una nueva tendencia hacia la sustitución de adhesivos químicos utilizados actualmente por adhesivos ecológicos, de manera de reducir el uso de materiales tóxicos en la industria de la construcción.<sup>10</sup>

Por consecuencia, el micelio posee un gran potencial para ser utilizado como material adhesivo ecológico reemplazando el adhesivo sintético en la producción de tableros de madera.

**10** Ching Khoo, S., Xi Peng, W., Yang, Y., Bo Ge, S., Fhong Soon, C., Ling Ma, N., & Sonne, C. (2020). Development of formaldehyde-free bio-board produced from mushroom mycelium and substrate waste. *Journal of Hazardous Materials*.



Microscopía SEM de la microestructura del micelio.

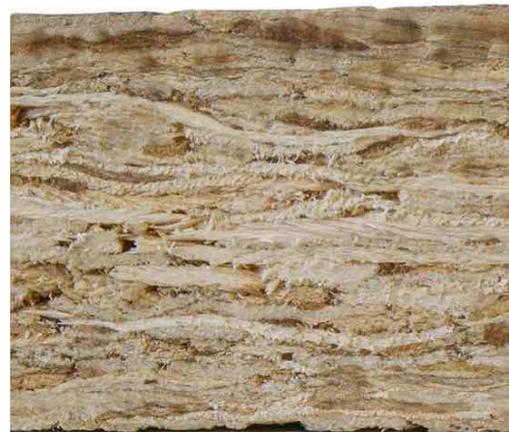


Microscopía SEM de una muestra de OSB.



**Figura 10.** Vista ampliada de un tablero de micelio que muestra la distribución de partículas (rastrojo de maíz) dentro de la matriz de micelio (blanco) \*

\*M. R. Islam, G. T. (2018). *Mechanical behavior of mycelium-based particulate*. NY, USA: Springer Science+Business Media.



**Figura 11.** Vista ampliada de un tablero de OSB. \*\*

\*\*Lube, V. M. (2016). *Effects of moisture-induced thickness swelling on the microstructure of oriented strand board*. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA: The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies.

### 3.4 Ventajas y desventajas

Se enumeran principales ventajas y desventajas los tableros de micelio hoy en día:

#### Ventajas:

- Totalmente biodegradables
- Libres de formaldehídos
- Compostable
- Reutilización de desechos de la industria agrícola
- Procesos no contaminantes
- Buen aislante
- Costos de producción competitivos con la industria de la construcción

#### Desventajas:

- Incapacidad de funcionar estructuralmente en un proyecto de arquitectura
- Corto período de vida al estar expuesto a las condiciones externas del ambiente

### 3.5 Ejemplo del mercado: Mycoboard

El tablero Mycoboard desarrollado por la empresa Ecovative consiste en un tablero donde el micelio de hongo funciona como aglutinante de distintos residuos de la industria agrícola como astillas de madera y rastrojos de maíz. Este tablero busca reemplazar tableros de madera convencionales los cuales, en su composición, contienen un 85% de madera. El resto de su composición son, en primer lugar, resinas sintéticas que derivan del gas natural (el cual es un recurso limitado) y, en segundo lugar, formaldehídos que resultan cancerígenos. De esta

manera, se propone un tablero económicamente competitivo y seguro para la salud de quienes lo utilicen.

En el vídeo “Ecovative Design: Manufactured Wood Made Without Trees” de la empresa, se muestra el proceso de fabricación de estos tableros: donde primero se deja crecer el micelio en el sustrato durante 4 días para luego ser prensado en calor. Al pasar por el prensado en calor, el agua contenida en el tablero se evapora y producto de las altas temperatura el hongo muere. Lo que logra la prensa es consolidar y aplastar el material, disminuyendo el grosor del tablero y aumentando exponencialmente la rigidez de la pieza.

Hasta ahora, Ecovative ha podido hacer sillas y materiales para embalaje con su mezcla de residuos vegetales y micelio, pero la empresa entiende que este es solo el comienzo de mucho que se puede hacer con hongos. (figura 9) La información entregada en el paper: “A Formaldehyde-Free, Sustainable Alternative for the Engineered Wood Industry” del Dr. Gregory J. Tudryn donde analiza las propiedades físico-mecánicas de los tableros Myco boards comparándolos con tableros de MDF ambos dos de un espesor de 12,7mm, muestra como los tableros Myco board pueden empezar a asimilarse a las propiedades de un MDF con una diferencia considerable en el gasto de energía que requiere su producción y sin emisiones de formaldehído. (Ver tabla figura 14).



**Figura 12.** Imágenes tableros Mycoboard tomadas del vídeo “Ecovative Design: Manufactured Wood Made Without Trees”

Hongo	Sustratos	Medidas	Peso	Fotografías
Pleurotus Ostreatus	Viruta de madera	290 x 165 x 60 mm	650 gr.	
Trametes versicolor	Viruta de madera	160 x 25 x 20 mm	350 gr.	
Pleurotus Ostreatus	Paja	400 x 180 x 70 mm	11,06 gr.	
Pleurotus Ostreatus	Cáscara de nuez	d=200 mm h=100 mm e=20 mm	600 gr.	

**Figura 13.** Tabla comparación materiales realizados en el Laboratorio de Biofabricación UC. Elaboración propia

### 3.6 Laboratorio de Biofabricación

Se enumeran y detallan las características de 4 materiales de micelio fabricados en el Laboratorio de Biofabricación UC, de manera de poder compararlos con otros materiales conocidos. (Ver tabla figura 13)

### 3.7 Comparación tableros madera

En la tabla de la figura 15 se hace una comparación entre:

-Materiales fabricados en el Laboratorio de Biofabricación UC

-Materiales realizados en el estudio del paper “Fabrication factors influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites”,

-El tablero Mycoboard de la industria Ecovative

-Tableros de MDF y OSB. (de manera de compararlos con materiales ya conocidos en la industria).

En la tabla puede observarse las distintas densidades que pueden llegar a tener los distintos materiales de micelio y qué tanto pueden llegar a asemejarse a un tablero de madera,

	<i>Mycoboard</i>	<i>MDF</i>
<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	0,48	0,84
<i>Módulo de ruptura (psi)</i>	820	1595
<i>Módulo de Elasticidad (psi)</i>	120400	217500
<i>Fuerza de sujeción del tornillo (lbf)</i>	110	132
<i>Fuerza de unión interna (lbf)</i>	55	44
<i>Energía para producirse (MJ/ft<sup>3</sup>)</i>	79,5	234,9
<i>Emisión de Formaldehído</i>	<0,001	5

**Figura 14.** Tabla Physical performance metric for flat engineered wood products at 0.50 thickness (Tudryn, 2014)

	<i>Sustrato</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Prensado</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>
<i>TRH (Appels)</i>	Paja	8,8	Prensado en calor	0,35
<i>PCH (Appels)</i>	Fibras de algodón	8	Prensado en calor	0,35
<i>PRH (Appels)</i>	Paja	9,5	Prensado en calor	0,39
<i>Mycoboard</i>	Rastrojo de maíz	12,7	Prensado en calor	0,48
<i>Monumento abierto</i>	Paja	70	Prensado en frío	0,0694
<i>Panera Sebastián Rodríguez</i>	Cáscara de nuez	20	Prensado en frío	0,588
<i>Bloque Luciano Cuq</i>	Viruta de madera	20	Prensado en crecimiento	0,138
<i>Bloque Matías Elliot</i>	Viruta de madera	60	Prensado en frío	0,226
<i>MDF</i>	-	12,7	-	0,84
<i>OSB</i>	-	12	-	0,65

**Figura 15.** Tabla comparación materiales. Elaboración propia



**Figura 16.** Hy-Fi Tower. (Valencia, N. (2014). Biodiseño: YAP MoMA inaugura Hy-Fi, la torre de ladrillos orgánicos y compostables. Plataforma Arquitectura)



**Figura 17.** Imagen tomada de la revista: "Fourth Holcim Awards – Regional and global Holcim Awards competitions for sustainable construction projects and visions 2014/2015"



**Figura 18.** The Growing Pavilion. Fotografía Oscar Vink



**Figura 19.** The Growing Pavilion. Fotografía Eric Melander

### 3.8 Arquitectura y micelio: una primera aproximación

En el estudio de referentes de construcciones con biomateriales, no se ha llegado a un proyecto construido donde el material como tablero funcione de manera estructural por sí mismo. Pese a ello, un estudio de proyectos existentes permite observar cómo se construyen y cómo son las uniones del material a otras estructuras. Estudiar la construcción y categorizar las diferentes construcciones que se han hecho con micelio y poder establecer cuál es su desempeño estructural, cuáles son los tamaños que se ocupa en el material habitualmente y como se unen a otros materiales para poder establecer que tan grande es el desafío de hacer el cambio de escala.

#### 3.8.1 Hy-Fi – The Living

El proyecto Hy-Fi fue el ganador de la décima quinta edición del Young Architects Program (YAP). Fue diseñado por la oficina The Living. El proyecto consiste en un grupo de torres de más de 12 metros de altura, conformado por 10.000 ladrillos (figura 16) que se cultivaron con ayuda de la empresa Ecovative a partir de tallos de maíz triturados y micelio de hongo. La estructura permaneció durante 3 meses para luego ser desmontada y descomponer los ladrillos en abono.

Se conversó con los arquitectos David Benjamin y John Locke de The Living, quienes enviaron una descripción de cómo funcionó la unión entre ladrillos en este proyecto. Los arquitectos explican que la estructura soportaba distintas exigencias, incluyendo vientos muy fuertes, dado que el proyecto se situaba en la ciudad de Nueva York en época de verano. En la figura 20 puede observarse cómo los ladrillos de micelio fueron unidos utilizando mortero compostable. Si bien no es un proyecto donde se utilicen

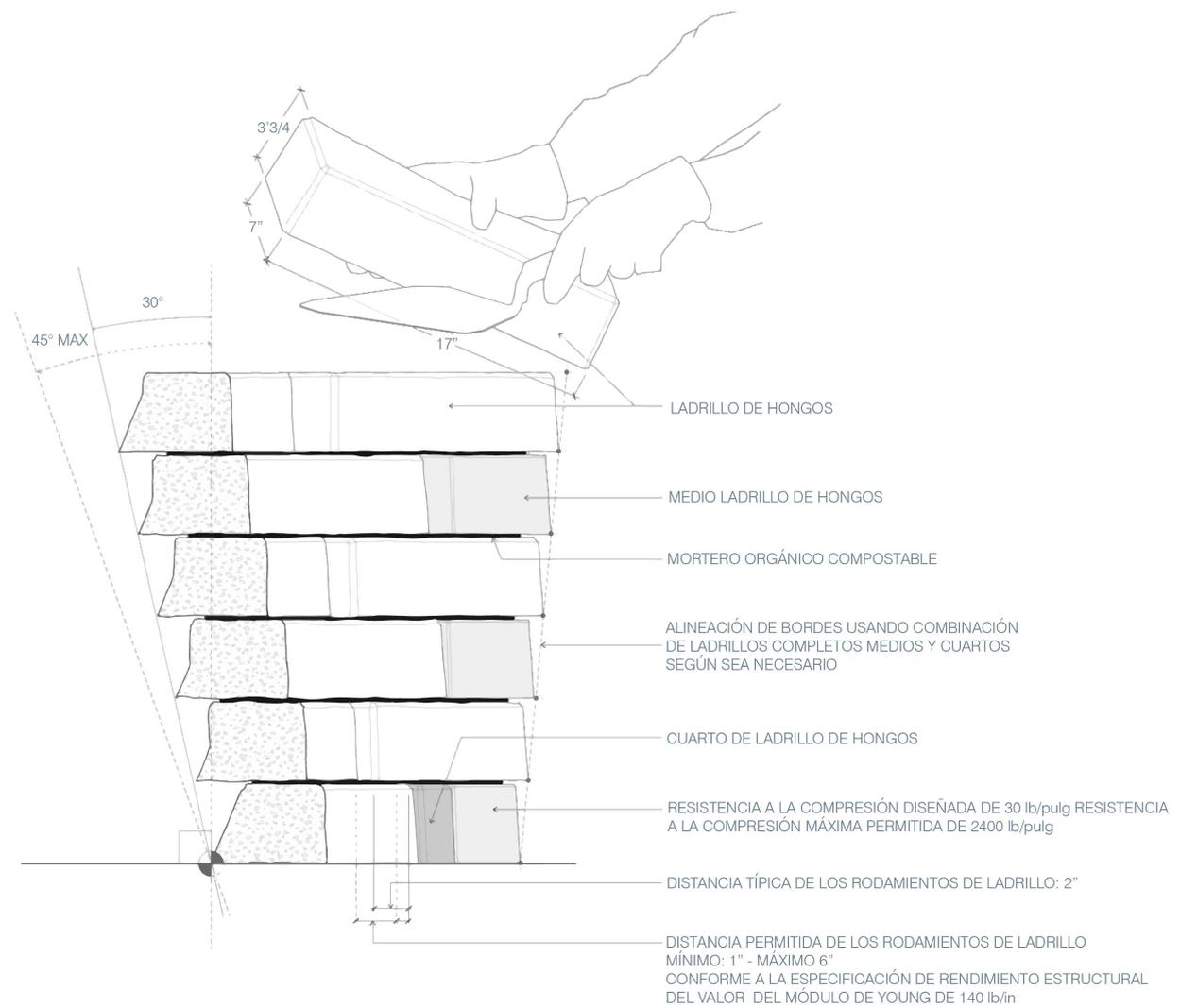
tableros de micelio, se estudia cómo es la unión entre ladrillos rescatando que, al ser una unión de apilamiento con mortero, funciona de manera superficial sin cargar más una parte del material como lo haría una unión puntual.

#### 3.8.2 Growing Pavilion

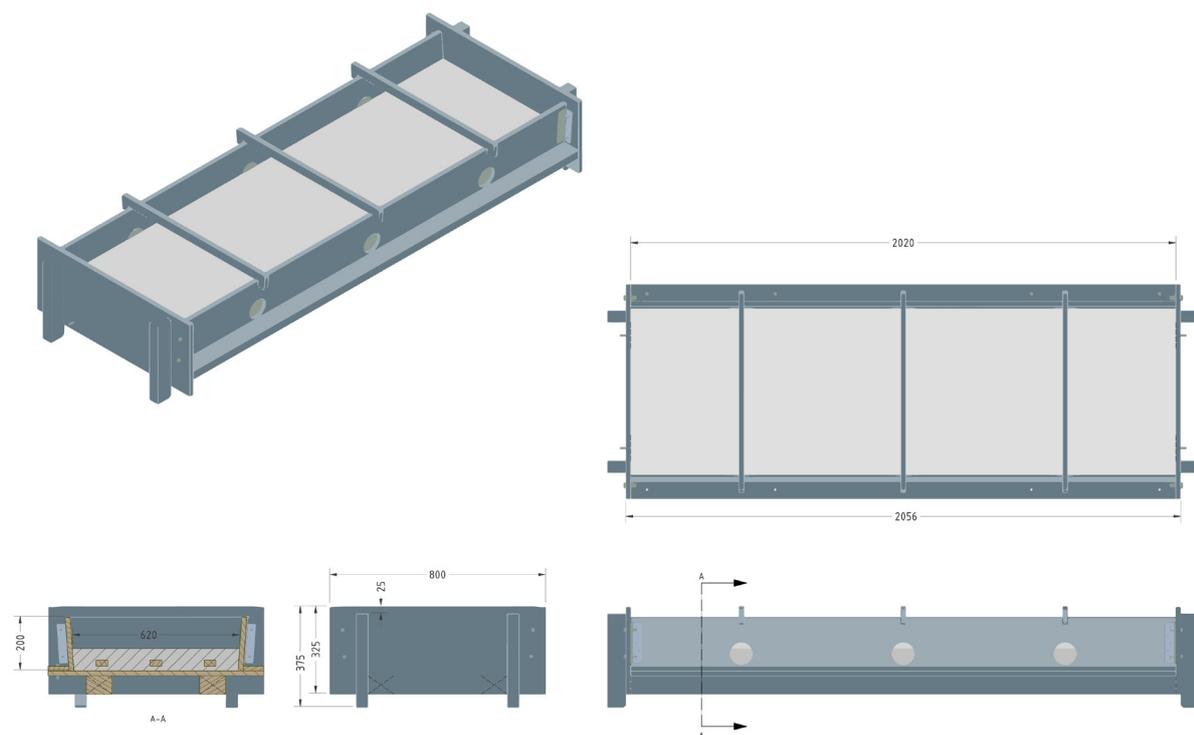
Este pabellón fue diseñado para la Dutch Design Week por el equipo de Biobased Creations de Company New Heroes en conjunto con la Dutch Design Foundation. Está conformado por madera, cáñamo, micelio y rastrojos de algodón.

Según lo conversado con Emiel Rietvelt de Company New Heroes —quién envió una descripción de cómo se unían los paneles de micelio a la estructura de madera que existe al interior del pabellón— se decidió cultivar escaleras de madera dentro de los paneles de micelio, estando estas a 1 cm por debajo de la superficie impidiendo que el público las vea. Desde el interior se atornillaron los paneles de micelio a la estructura de madera. En la figura 21 puede verse un dibujo de cómo fueron pensadas las escaleras de madera que se insertaron dentro de los paneles de micelio.

En este proyecto, si bien al cultivar paneles con una estructura de madera adentro hace que el material no trabaje estructuralmente por sí solo, resulta interesante observar como la combinación con un material más resistente como la madera permite la implementación de una unión de tornillos para poder unirse a la estructura principal.



**Figura 20.** Detalle constructivo Hy-Fi. Imagen cortesía de John Locke, Arquitecto de The Living



**Figura 21.** Detalle constructivo Growing Pavilion. Adaptación Imagen cortesía de Emiel Rietvelt, Company New Heroes.



## 04 Forma estructurante

# Materiales de micelio y aproximación al desarrollo de un componente constructivo

Frente al problema estructural que conlleva utilizar paneles no estructurales como principales elementos constituyentes se llega a las formas plegadas las cuales permiten darle mayor resistencia estructural a un plano (tablero). Mediante la placa plegada se explora una solución arquitectónica con cualidades físicas, de textura, y espaciales consistente con las actuales posibilidades que se ha ido desarrollando en la ciencia de los materiales. Acorde a lo señalado, en este capítulo se estudia el uso de placas plegadas en paneles de madera en proyectos de arquitectura. La relevancia del análisis se vincula a que la resistencia de las uniones entre los paneles constituye una condición ineludible para su utilidad constructiva.

## 4.1 Placa plegada

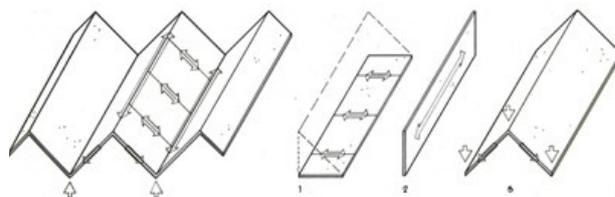
El principio de las placas plegadas consiste en el aumento de la altura de sección de la estructura en comparación con el grosor del material utilizado (ver figura 22). De esta manera, al doblar una placa se aumenta su resistencia y permite extenderse como una viga. Las placas plegadas resisten tensiones de flexión primarias en su sección inclinada y las tensiones máximas se encuentran en el doblar mismo (la cresta y el valle de los pliegues). La profundidad de los pliegues de la placa es proporcional a su resistencia a la flexión. Existen placas plegadas de hormigón armado o acero, pero también se pueden utilizar paneles de madera lo que da como resultado una relación peso-vano mucho menor.

El doblar de las placas permite distintas disposiciones, tal como se indica en lo que inmediatamente sigue:

Perfil: se pueden orientar tanto horizontal como verticalmente para producir estructuras como torres o cúpulas (eje vertical) o techos (eje horizontal).

Escala: el tipo y el tamaño de pliegues pueden ir variando proporcionalmente, cambiando las subdivisiones de la sección

Profundidad: mientras más profundos son los pliegues, más capacidad estructural se gana, ofreciendo más resistencia a los momentos de flexión.<sup>11</sup>



**Figura 22.** Acción de carga triple de una placa plegada: las estructuras de placa plegada combinan acción de losa, placa y marco. Izq. flujo simplificado de tensiones en un solo pliegue. 1. Acción de losa 2. Acción de placa 3. Acción de entramado (marco) (Engel, 1977)

## 4.2. Estructuras de Placa Plegada en madera

El diseño de estructuras plegadas en madera ha ido incrementando en los últimos años. Mientras que las estructuras de madera tradicionales utilizan paneles de madera como estructura secundaria (para revestimiento o arriostramiento), nuevas tipologías como la de Placa Plegada utilizan los paneles de madera como estructura principal de soporte de carga. La forma de estas estructuras permite que los paneles integren una acción combinada de losa y placa. Si bien la construcción de sistemas de estructuras autoportantes recurriendo a paneles de madera aporta nuevos beneficios como relación peso – resistencia mucho menor, cuando las placas plegadas ‘son originadas en superficies de hormigón se entienden como estructuras continuas, por lo que al ser construidas con paneles de madera requieren juntas de borde entre placas resistentes.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*. Actar and The President and Fellows of Harvard College.

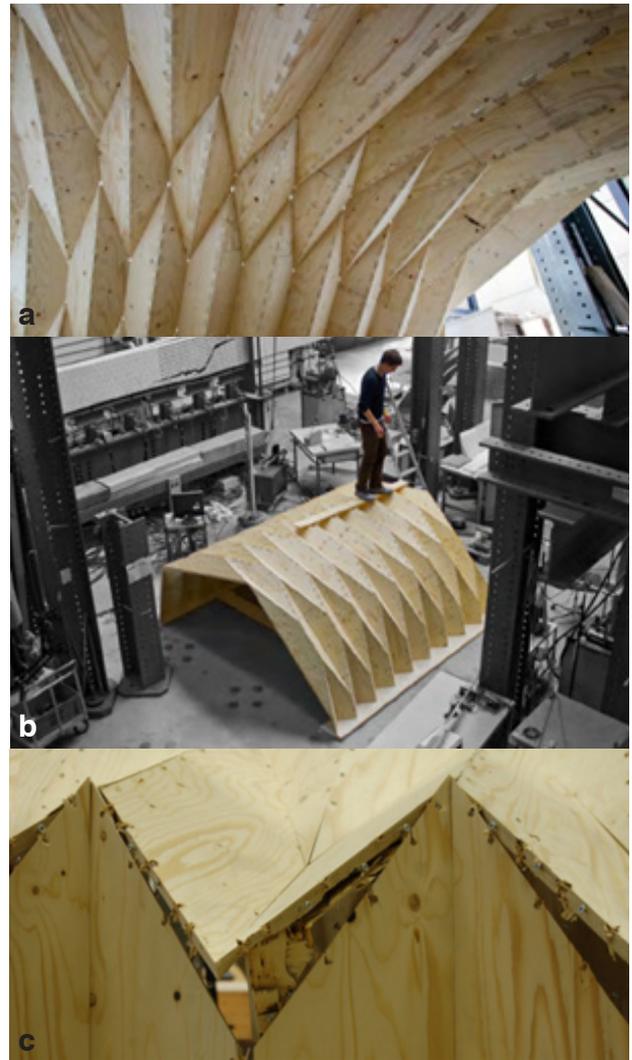
<sup>12</sup> Werner, C., & Robeller, M. (2015). *Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures*. Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.



**Figura 23.** Fotografías Capilla St. Loup de Fred Hatt (Werner & Robeller, 2015)



**Figura 24.** Fotografías Teatro Vidy - Lausanne. Imágenes tomadas de web Arch Daily



**Figura 25.** a y b: Prototipo de cáscara plegada construido a partir de paneles LVL de 21 mm, ensamblado con juntas de cola de milano sin unión adhesiva. c: Falla de la unión durante la prueba de carga. Fotografía de Hani Buri (Werner & Robeller, 2015)



**Figura 26.** Fotografía Thanhausen Music Rehearsal Hall de Hiendl Schineis Architekten (Werner & Robeller, 2015)

## 4.2.1 Referentes Constructivos

### Capilla temporal para las diaconisas de St-Loup / Danilo Mondada + LOCALARCHITECTURE

Construida en 2008 en la ciudad de Pompaples, Suiza, fue pensada para ser temporal, sin embargo, hasta el momento sigue en pie.

Consiste en una estructura de placa plegada con una luz de 9 metros construido con paneles de madera contra laminada (CLT). EL techo se conforma por 14 paneles con un espesor de 60mm y las paredes se conforman por 28 paneles de 40mm de espesor. Las uniones entre paneles están conformadas por conectores de placa metálica de 2 mm de espesor, hechos a medida para los ángulos del edificio. Los conectores se acoplan a los paneles de madera mediante tornillos para madera.

### Teatro Vidy-Lausanne / Yves Weinand Architects saerl y Atelier Cube

El Pabellón del Teatro Vidy-Lausanne es resultado de una transferencia tecnológica del laboratorio IBOIS para construcciones en madera.

Está conformada principalmente de madera, en donde se utiliza una técnica de montaje de doble capa utilizando paneles plegados, que son al mismo tiempo, estructura portante y revestimiento.

Las uniones se realizan con conectores madera-madera mediante encajes, cuyo corte preciso y específico, fue posible gracias al desarrollo de la carpintería automatizada.

La investigación de IBOIS aplicada al Pabellón ha llevado al desarrollo de una estructura de soporte que se extiende en una distancia de 16 a 20 m sin pilares y con un espesor de panel de solo 45 mm. La distancia entre las dos capas

es de 300 mm desde la parte superior del panel exterior hasta la parte inferior del panel interior.<sup>13</sup>

### Prototipo / Christopher Robeller y Yves Weinand

Otro ejemplo de estructura de origami es el prototipo realizado por Christopher Robeller y Yves Weinand, donde, como ellos indican, una cáscara de paneles de madera combina las ventajas estructurales de los paneles de madera con la eficacia de las placas plegadas. Se hace hincapié en la eficacia de las juntas ya que estas deben proporcionar suficiente soporte para los paneles adyacentes a fin de garantizar un sistema de carga eficiente.

La estructura fue construida a partir de componentes cuadriláteros de forma trapezoidal con ángulos opuestos obtusos. Las uniones entre paneles se realizaron mediante empalmes en diagonal y tornillos.

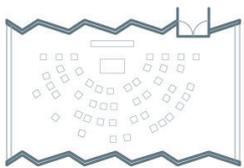
Benjamin Hahn en su tesis de maestría investiga el comportamiento de carga del prototipo, donde se le aplica una fuerza lineal al centro hasta la falla (figura 25c). En su estudio se concluye que el desempeño estructural podría mejorarse mediante conexiones más rígidas.

### Thanhausen Music Rehearsal Hall

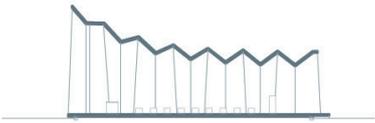
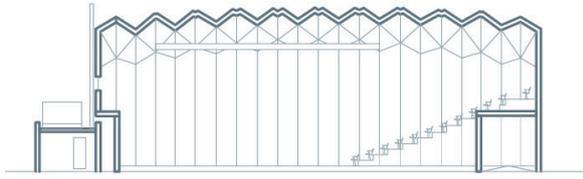
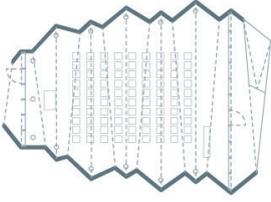
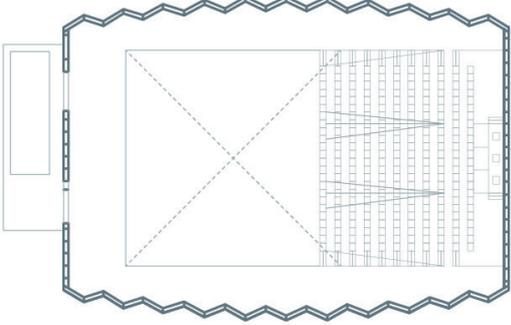
Fue construida en 2004, cerca de Augsburg, Alemania. Se compone de paneles de madera laminada de 100 mm de espesor tanto en las paredes como en el techo. Tiene una luz de 10 metros. La estructura de placa plegada fue diseñada para una sala de ensayos de música en Thannhausen

---

**13** Luco, A. (2021, 7 octubre). Timber Pavilion of the Vidy-Lausanne Theatre / Yves Weinand Architectes saerl + Atelier Cube. ArchDaily.

NOMBRE	Thanhausen Music Rehearsal Hall	Prototipo Christopher Robeller & Yves Weinand
MATERIALIDAD	Paneles de madera laminada encolada con un espesor de 100 mm	Paneles madera contrachapada
ALTURA	3,5 m	1,25 m
LUZ MÁXIMA	10 m	3 m
CORTE		
PLANTA		

**Figura 27.** Tabla Comparación Referentes Constructivos de Sistemas Plegados. Elaboración Propia

<p>Capilla St. Loup</p>	<p>Teatro Vidy-Laussane</p>
<p>Madera contralaminada (CLT)</p>	<p>Paneles LVL de 21mm y paneles de madera contrachapada 15mm</p>
<p>5 m</p>	<p>9,5 m</p>
<p>11,5 m</p>	<p>20 m</p>
	
	

## 05 Componente material micelio

Este capítulo trata de lo anunciado en la tercera parte de la metodología: esto es, la validación de la solución tecnológica constructiva a partir de la simulación que constituye el desarrollo de un proyecto de arquitectura. Para ello: se va a poner a prueba el sistema evaluando: 1) su capacidad formal de construir una espacialidad o definir un interior resguardado, 2) se va a hacer una prueba constructiva con una maqueta a escala 1:50 del componente; y 3) se realizará una prueba de la unión con paneles de micelio ya existentes para evaluar su resistencia y establecer si es replicable a una escala mayor.

Del panel se llega a la placa plegada, para luego pasar a una solución constructiva y finalmente a la utilización del sistema constructivo en un proyecto de arquitectura emplazado en un lugar específico.

Teniendo en consideración las características que puede llegar a tener un tablero de micelio y las ventajas que nos entrega una forma plegada, se hace la propuesta de un componente arquitectónico con tableros de micelio de hongo *Pleurotus Ostreatus* y sustrato de viruta de madera, con un procesamiento posterior de prensado en calor. Además, se propone disponer los paneles formando una superficie plegada la cual, en conjunto, con otros materiales como madera, tensores y pletinas metálicas, logren conformar un componente capaz de resistir a todas las solicitaciones existentes en un proyecto de arquitectura.

### 5.1 Prestaciones y solicitaciones

Prestaciones:

- Material liviano permite un sistema constructivo liviano.
- Material ecológico
- Material de unión superficial más que puntual

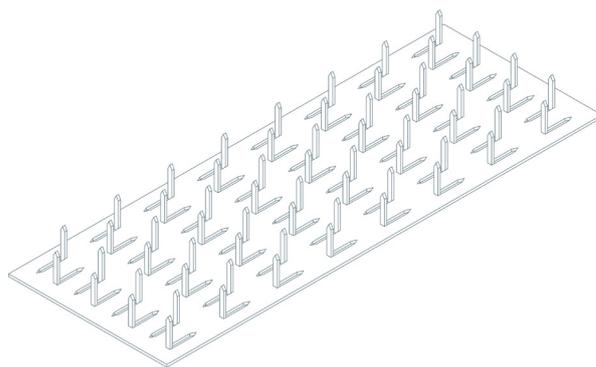
Solicitaciones:

- Debe soportar condiciones climáticas como lluvia
- Unión que permita formar estructura plegada a partir de tableros de micelio
- Funcionar a tensión y compresión
- Sistema que arriestre
- Resistencia al pandeo

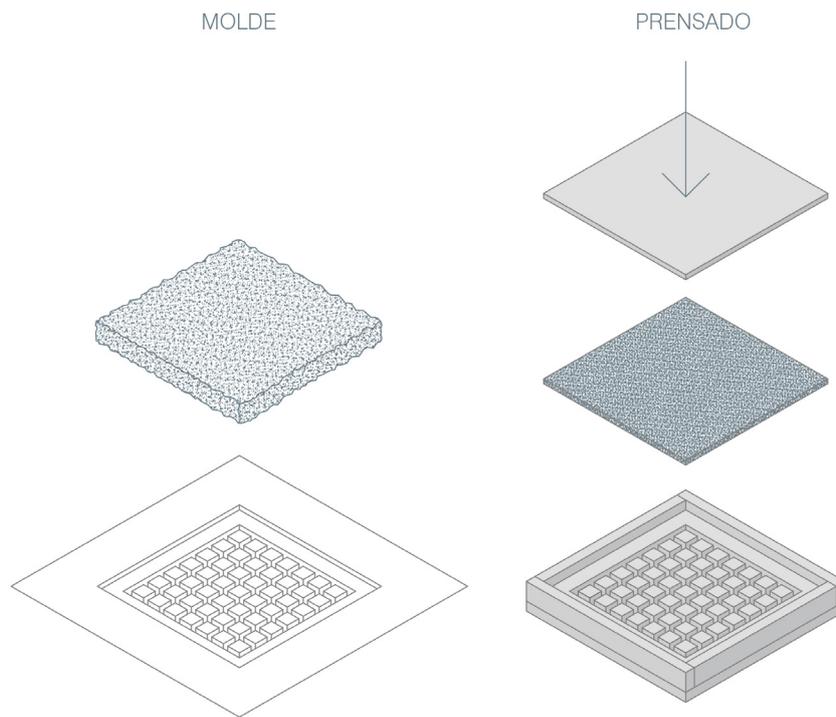
### 5.2 Sistema Unión de Placas

El parecido estructural que poseen los paneles de micelio con el poliestireno expandido o paneles de madera no estructurales nos lleva a pensar que se hace necesario idear un sistema constructivo compuesto, para que este material pueda ser usado en construcción exitosamente. Al analizar los origamis y cómo estas plegaduras forman nervios que logran estructurar un papel, se pensó en un sistema que sirviese como unión entre paneles de micelio que, al posicionarlos en ángulo, funcionasen como nervios estructurales. La unión que se propone se hace necesaria que sea liviana, delgada y capaz de recibir los paneles de manera superficial, de modo de distribuir las fuerzas en un plano para que el panel de micelio no se rompa.

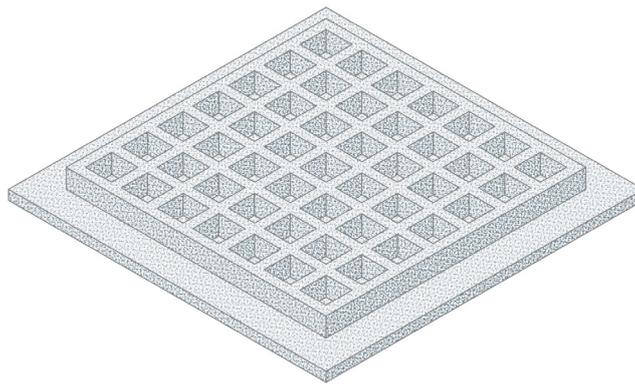
En respuesta a los anterior, se analizaron los esquineros de acero galvanizado utilizados para unir vulcanitas en las construcciones (material con propiedades físicas similares). Se analizaron también, las uniones de madera con placas dentadas donde la unión se hace con una superficie y no de manera puntual.



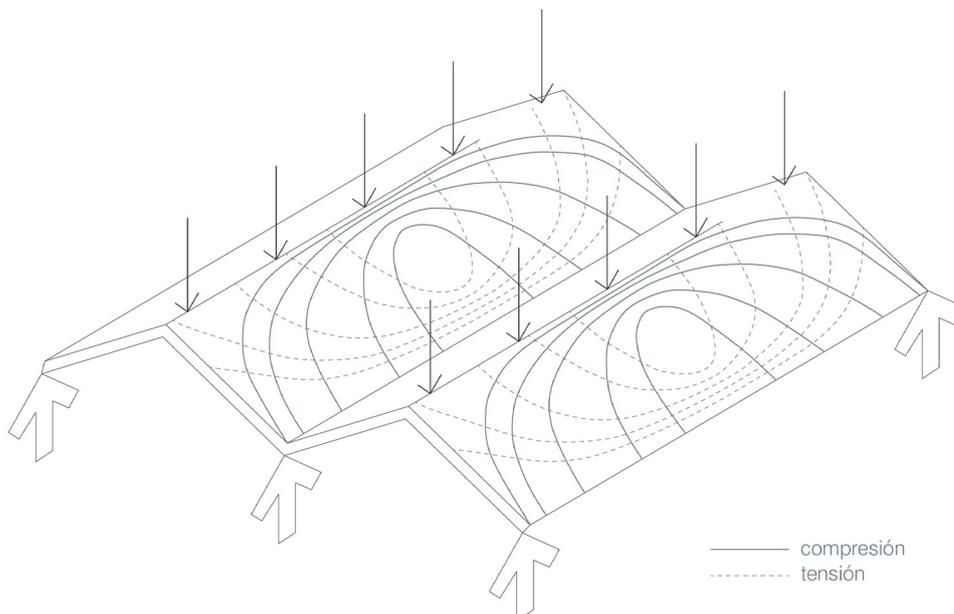
**Figura 28.** Placa dentada. Elaboración propia



**Figura 29.** Molde y prensado en calor. Elaboración propia.



**Figura 30.** Panel resultante. Elaboración propia.



**Figura 31.** Esfuerzos placa plegada. Adaptación imagen.

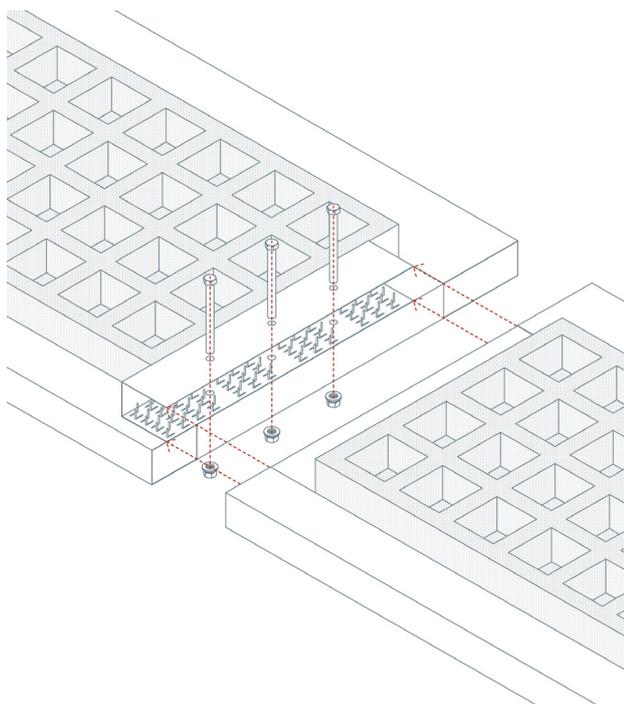
### 5.3 Panel como forma estructural (nervaduras)

Debido a la insuficiente de resistencia del material para funcionar estructuralmente, se decide explorar los pliegues para resolver dicha falencia, como ya se explicó en el capítulo anterior. Se estudian las placas nervadas y como son los nervios los que ayudan a estructurar el panel. Teniendo esto en consideración se propone un panel nervado, con bordes lisos de 15 cm de manera de facilitar las uniones entre sí (figura 30). Se considera que sean paneles prensados en calor para darle la mayor resistencia al panel posible.

### 5.4 Protección material

Una correcta protección favorece que el material perdure en el tiempo, pues, al no estar expuesto a las condiciones exteriores, estará mucho menos expuesto al deterioro..

Se propone una cubierta de zinc sobre los paneles de micelio para que de esta forma quede protegido de lluvias y destrucciones mecánicas. Asimismo, el recubrimiento al material con



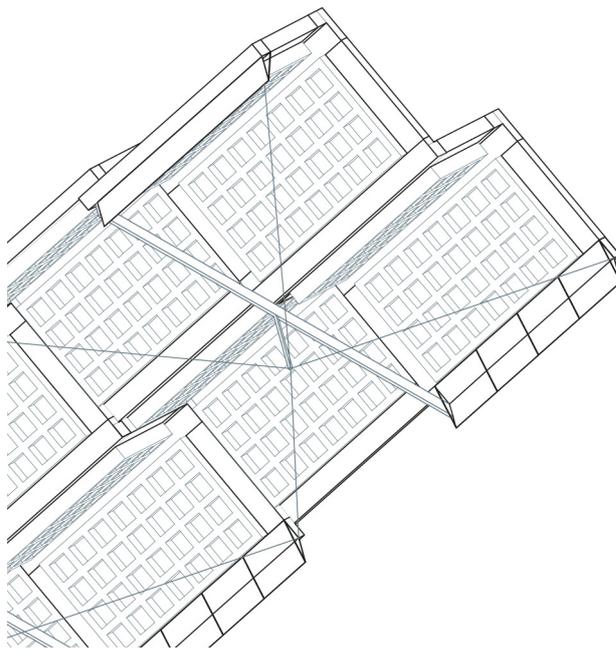
**Figura 32.** Unión paneles. Elaboración propia.

aceite de linaza y cal, la cual debido a su alto PH impide que crezcan hongos en la superficie. proporcionandole, al material mayor durabilidad frente a factores externos.

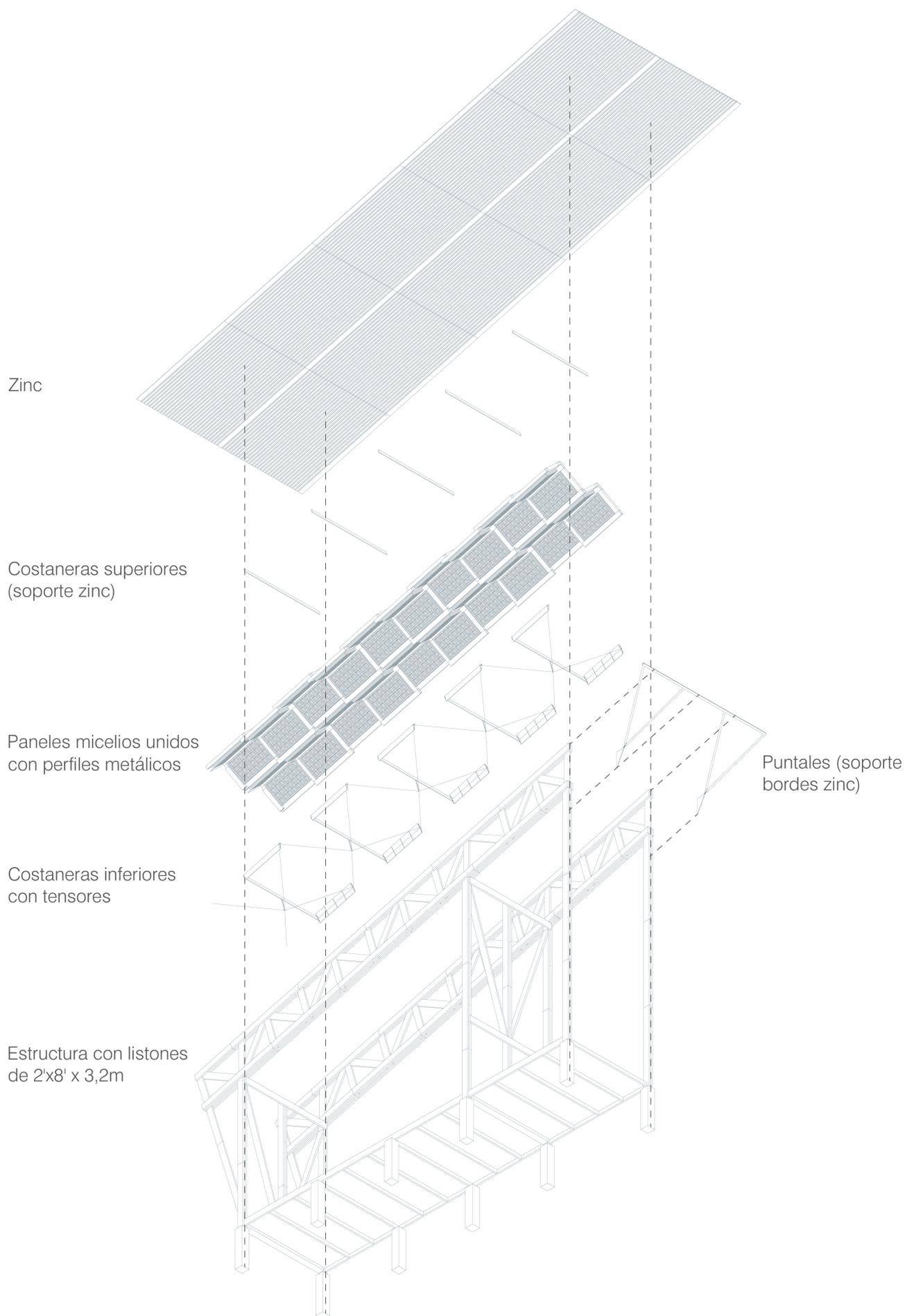
### 5.5 Propuesta componente constructivo

Se propone un componente que se posicione entre dos vigas de madera a una distancia de 3,2 metros entre sí. En cuanto a las uniones, se propone un sistema con aristas metálicas, conformadas por una chapa metálica de 2mm curvada en forma de C y dentada, de manera que se unan al panel de micelio de manera superficial como se muestra en la figura 32. Estos perfiles rigidizaran los bordes de los paneles permitiendo unirse entre ellos mediante pernos, asegurando además, un sistema fácilmente montable y desmontable.

Para arriostrar la estructura se proponen costaneras de madera entre las vigas. Desde ahí, un puntal con tensores hacia 4 extremos rigidizando la estructura en dos sentidos (figura 33). Por sobre el componente se proponen placas de zinc para proteger el material de micelio que generen una cubierta ventilada.



**Figura 33.** Tensores estructura. Elaboración propia.



**Figura 34.** Axonométrica Explotada sistema constructivo. Elaboración propia.

## 5.6 Capacidad estructural

Las placas dobladas largas se comportan como una viga que salva la luz entre los soportes de los extremos. Desarrolla esfuerzos de compresión a lo largo de la parte superior y esfuerzos de tensión a lo largo de la parte inferior.

En el sentido longitudinal, los paneles de micelio se disponen superpuestos de manera de reforzar sus uniones y permitir que el sistema funcione como un solo plano a lo largo. En las uniones inferiores que funcionan principalmente a tensión se refuerzan las uniones mediante un puntal con 4 tensores.

## 5.7 Maqueta

Se realizó una maqueta del sistema constructivo a escala 1:50.

La maqueta muestra un módulo que es capaz de conformar parte de un edificio. (Figura 35)



## 5.8 Experimentación paneles micelio

Se cultivó un tablero de micelio propuesto a escala.

### 5.8.1 Cepa, Cultivo in Vitro

Se trabajó con el hongo *Pleurotus Ostreatus* el cual fue cultivado en placas Petri con un medio fácil de sintetizar: PDA (Agar Papa Dextrosa) y se dejó crecer durante 2 semanas a una temperatura media de 21°C. (Figura 36)

### 5.8.2 Elección sustrato

Se escogió como sustrato orgánico, viruta de madera de pino, la cual fue sumergida en agua durante 30 minutos para ser hidratada y luego autoclavada en una olla a presión a una temperatura de 100°C durante 80 minutos, lo que permite disminuir la cantidad de organismos presentes en el sustrato. (Figura 37 y 38)

### 5.8.3 Producción material

Se creó "spawn" a partir de arroz integral cocido, el cual fue esterilizado en frascos de vidrio dentro de una olla (mismo proceso de autoclave de sustrato). Dentro del frasco se inoculó un



**Figura 35.** Fotografías maqueta sistema constructivo



**Figura 36.** Fotografías micelio de *Pleurotus Ostreatus* creciendo en placa petri sobre un medio PDA (crecimiento 2 semanas).



**Figura 37.** Olla autoclave.



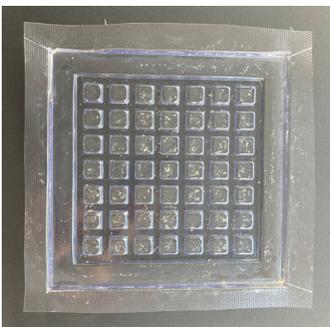
**Figura 38.** Viruta madera de pino.



**Figura 39.** Crecimiento spawn en frasco.



**Figura 40.** Crecimiento en bolsa del micelio sobre el sustrato.



**Figura 41.** Molde termoformado



**Figura 42.** Prensado en frío del tablero.



**Figura 43.** Tableros con y sin colada de cal.



**Figura 44.** Detalle unión entre tableros.

pedazo del micelio de hongo crecido en placa petri y se dejó crecer por dos semanas. (Figura 39)

Una vez que el micelio colonizó todo el arroz integral se traspasó el hongo al sustrato lignocelulósico (viruta de madera) en bolsas plásticas con perforaciones de manera que recibiera oxígeno y pudiera controlarse el crecimiento del hongo (figura 40). A esto se le agregó un 2% de cal según su peso, para regular el PH de la mezcla. El hongo *Pleurotus Ostreatus* creció en PH 8. De esta manera, se le hizo más fácil la colonización al micelio y más difícil la colonización a otro tipo de hongos, evitando así, posibles contaminaciones. Además, se le agregó un 5% de harina para proporcionar una fuente de carbono fácil de extraer para el micelio. Esto se dejó en incubadoras sin luz y una temperatura media de 21°C y humedad a saturación ambiental.

#### 5.8.4 Moldeado

Una vez que las virutas de madera se encuentran colonizadas por el micelio se traspasan a moldes termoformados en planchas de PVC DE 0,5mm (figura 41) de manera de darle forma al material. En esta etapa las condiciones de crecimiento son iguales a las del proceso de crecimiento en bolsa.

El material se deja crecer con presión mediante prensas, de manera de conseguir un material más denso y resistente. (Figura 42)

#### 5.8.5 Tratamientos post - cultivo

Una vez crecido el material fue sometido a 150°C de calor en un horno convencional por 30 minutos y luego a una temperatura de 100 °C durante 30 minutos más. De esta manera, el hongo muere y no sigue colonizando el sustrato. Una vez seco se le da una colada de cal al

material con una proporción de 100ml de agua cada 5 gramos de cal. (Figura 43)

#### 5.8.6 Conclusiones Proceso de fabricación

Luego del proceso de fabricación se concluye que los tableros fabricados no quedaron lo suficientemente resistentes debido a dos principales factores:

1. El sustrato utilizado era de una granulometría grande por lo que no logró llenar bien los espacios del molde (los cuales al estar a escala eran pequeños). Se concluye que de fabricarse el panel a escala 1:1 el material crecería de mejor manera llegando a todos los espacios del molde
2. La presión que se le aplico al tablero no fue correcta ya que al ser aplicada en 4 puntos el molde se curvó en el centro y el material no creció con la presión suficiente, es por esto que estas pruebas quedaron con características más similares a una espuma.

\*Diversas investigaciones han demostrado que el prensado en calor mejora considerablemente las cualidades mecánicas del material, por lo que se toma en consideración que el tener acceso a una prensa de calor pudiese aumentar la resistencia del material obtenido.

#### 5.9 Experimentación uniones entre tableros

Se cultivaron tableros de micelio con un procedimiento similar al mencionado anteriormente en un molde de 13x13cm, con una presión constante.

Estas muestras sirvieron para probar las uniones entre tablero propuestas.

Como se ve en la figura 44 se recubren los bordes con un perfil de Metalcon en C, del cual se agarran pernos permitiendo una unión firme y de fácil ensamblaje entre tableros.

## 06 Proyecto de Arquitectura

Se propone un Centro de Interpretación del Paisaje y Visitantes en Bahía Exploradores.

Se busca un proyecto de arquitectura que sea liviano, de fácil ensamblaje y desensamblaje pensando en la economía circular del proyecto y en la condición del lugar más alejada. De esta manera, se facilita la construcción y se crea un proyecto que se posa en el paisaje sin modificarlo. El proyecto se concibe pensando en que una vez que se cumpla su ciclo de vida, la construcción podrá ser desensamblada y el micelio degradado en el lugar.

El proyecto busca ordenar el lugar entregando infraestructura necesaria para el público y sus distintos usuarios.

## 6.1 Formulación del Proyecto

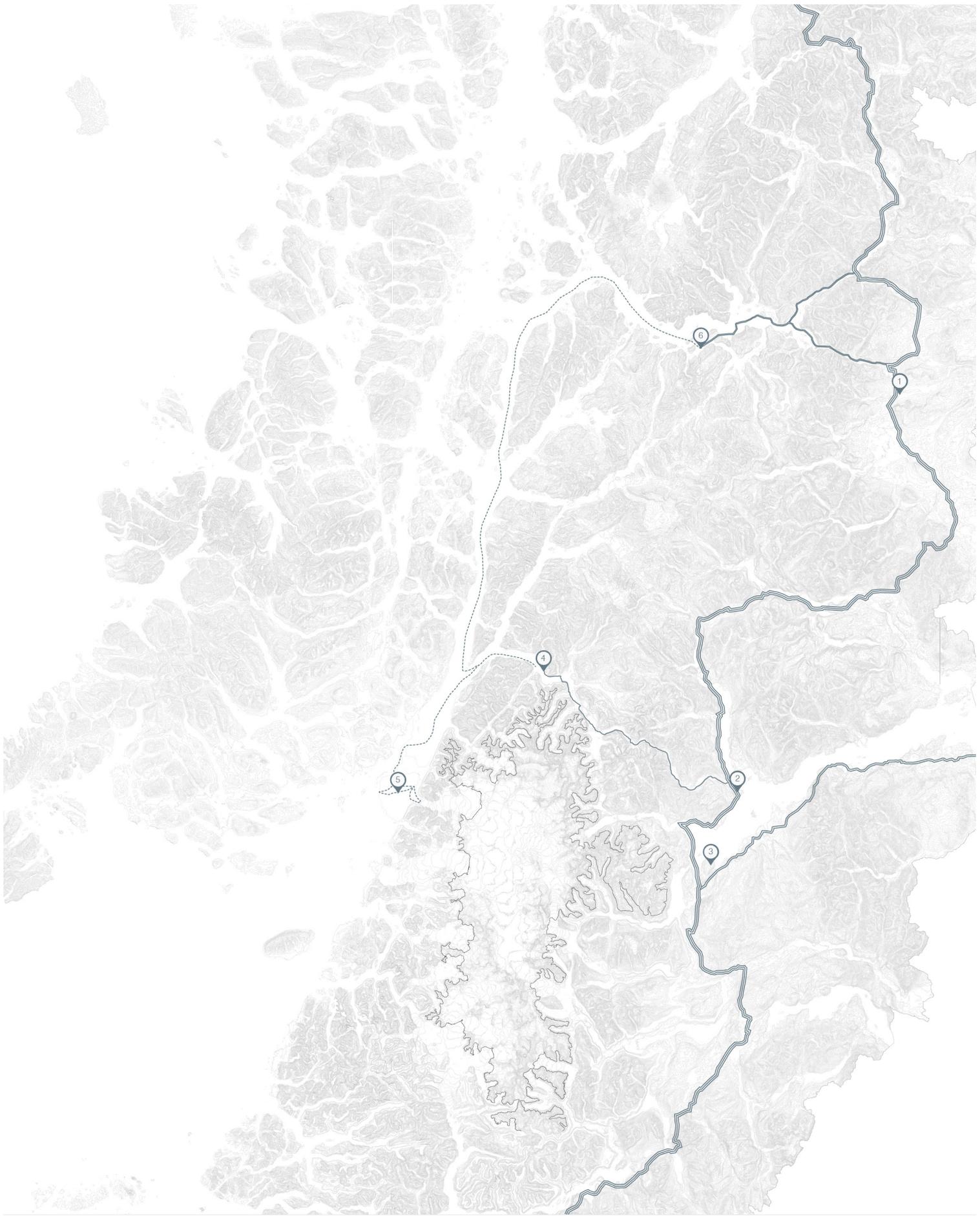
Localización: Los parques nacionales ubicados entre Puerto Montt y Cabo de Hornos almacenan casi el 30% del carbono total del suelo y la biomasa de todo Chile. Preservar este suelo y el carbono de la biomasa es necesario para limitar el calentamiento global. Así, por ejemplo, si consideramos el almacenamiento de carbono del Parque Nacional Laguna San Rafael, podemos constatar que éste almacena alrededor del 4% de carbono total atrapado en todo Chile. En el sitio web “La Ruta de los Parques”<sup>14</sup> se señala que: “Los bosques desempeñan una función decisiva para determinar la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ya que actúan como sumideros de carbono, absorbiendo el CO<sub>2</sub> e incorporándolo a través de la fotosíntesis a su estructura. Los parques nacionales aseguran la captura permanente de carbono. Frente a un escenario adverso, donde las emisiones de dióxido de carbono avanzan, y aumenta la deforestación y el cambio de uso de suelo, se vuelve cada día más urgente la protección de estos lugares para contrarrestar los efectos del cambio climático y para ayudar a revertir la crisis de extinción de especies.”

El Parque Nacional Laguna San Rafael es un lugar con muy poca intervención humana y de gran valor tanto patrimonial como medioambiental. Debido a recientes obras viales que han mejorado la conectividad en la zona donde está situado, se espera que el turismo vaya en alza, lo que irá aparejado con la construcción de nueva infraestructura para recibir a los visitantes.

Enfoque: El área de estudio general sobre el cual se enmarca esta investigación es el de arquitectura sustentable y ecológica. Más en concreto, el tema de interés es la construcción arquitectónica con materiales a base de micelio de hongo, y la economía circular en parques nacionales. Las investigaciones acerca de cómo la arquitectura puede constituir un aporte en la protección del patrimonio natural chileno y en la reducción del aceleramiento del cambio climático, debieran ser de utilidad para la toma de buenas decisiones a corto, mediano y largo plazo. Un punto relevante es que las propiedades físico-mecánicas de las construcciones con biomateriales, no han alcanzado hasta la fecha los estándares propios de los materiales convencionales de producción, por lo que, se hace necesario invertir en la investigación de estos materiales y su utilización.

A nivel mundial, el problema ambiental que representa la aceleración del calentamiento global, es algo que nos hace cuestionarnos de qué manera aportar para revertir esta situación desde el ámbito de la arquitectura y las construcciones. Desde este punto de vista se hace fundamental contar con opciones de construcción que, siendo deferentes con la identidad del lugar, resguarden el frágil ecosistema.

<sup>14</sup> Ruta de los Parques de la Patagonia: uno de los principales sumideros de carbono de Sudamérica. (30 de septiembre de 2020). Obtenido de La Ruta de los Parques: <https://www.rutadelosparques.org/ruta-de-los-parques-de-la-patagonia-uno-de-los-principales-sumideros-de-carbono-de-sudamerica/>



- |  |                |   |                      |
|--|----------------|---|----------------------|
|  | Ruta 7         | 1 | Coyhaique            |
|  | Ruta X-728     | 2 | Puerto Río Tranquilo |
|  | Ruta Navegable | 3 | Puerto Guadal        |
|  | Ruta 265       | 4 | Puerto Grosse        |
|  | Ruta 240       | 5 | Laguna San Rafael    |
|  |                | 6 | Puerto Chacabuco     |

50 km

**Figura 45.** Plano Aysén, accesibilidad Puerto Grosse. Elaboración Propia

## 6.2 Lugar

“Esta dimensión, a la vez micro y macro geográfica, que caracteriza a la arquitectura, hace presente su profunda conexión con el fenómeno de la orientación. La obra de arquitectura cuando recoge esta dimensión geográfica se orienta frente a la geografía y a la vez constituye ella misma un signo de orientación en el paisaje. El espacio arquitectónico es entonces, desde sus fundamentos, un espacio orientado. Esto es válido no solamente frente al clima, sino también frente a la realidad gravitacional y a las posibilidades de acción y contemplación de sus habitantes.”.

“.. la arquitectura esta forzada a interpretar el lugar y a pronunciarse sobre él, ya afirmándolo, ya negándolo, ya modificándolo.”<sup>15</sup>

### 6.2.1 Valle Exploradores

Dentro del Parque Laguna San Rafael los recorridos diseñados se encuentran en el Valle Exploradores, un valle que une el Lago General Carrera con la Laguna San Rafael, el cual posee la ruta X728 comenzada el año 2009, la cual conecta por vía terrestre Bahía Exploradores con la localidad más cercana: Puerto Río Tranquilo y la ruta 7 o carretera Austral. En este sector se destaca la poca presencia antrópica en las localidades aledañas y prácticamente nula población que posee el Valle Exploradores la cual es meramente de carácter rural. Frente a esto se puede afirmar que nos encontramos en un lugar casi prístino (lo cual llama la atención de varios científicos e investigadores que vienen a estudiar el lugar),

El panorama recién indicado, podría variar dado que las recientes obras viales que han mejorado la conectividad en la zona y, consecuentemente, han traído consigo un aumento en el turismo.

<sup>15</sup> Pérez Oyarzún, F. (2007). Forma, materia, uso y lugar. En F. Pérez Oyarzún, A. Aravena, & J. Quintanilla, Los hechos de la arquitectura. Santiago, Chile: Ediciones ARQ.

### 6.2.2 Emplazamiento

“La condición de la arquitectura de estar situada en un lugar preciso y, por tanto, de enfrentar y configurar una situación, constituye una de sus notas fundamentales. La arquitectura se encuentra siempre en diálogo con otras formas o, al menos, con los trazos formales de una realidad que existe previamente a ella. De allí, la noción de preexistencia, o como se la suele denominar, preexistencia ambiental. Pero el lugar no es simplemente aquella realidad que está allí antes que la arquitectura; la obra de arquitectura contribuye decisivamente a configurar el lugar en que se sitúa. Este es parte de su sentido y es así como los lugares se establecen.”<sup>16</sup>

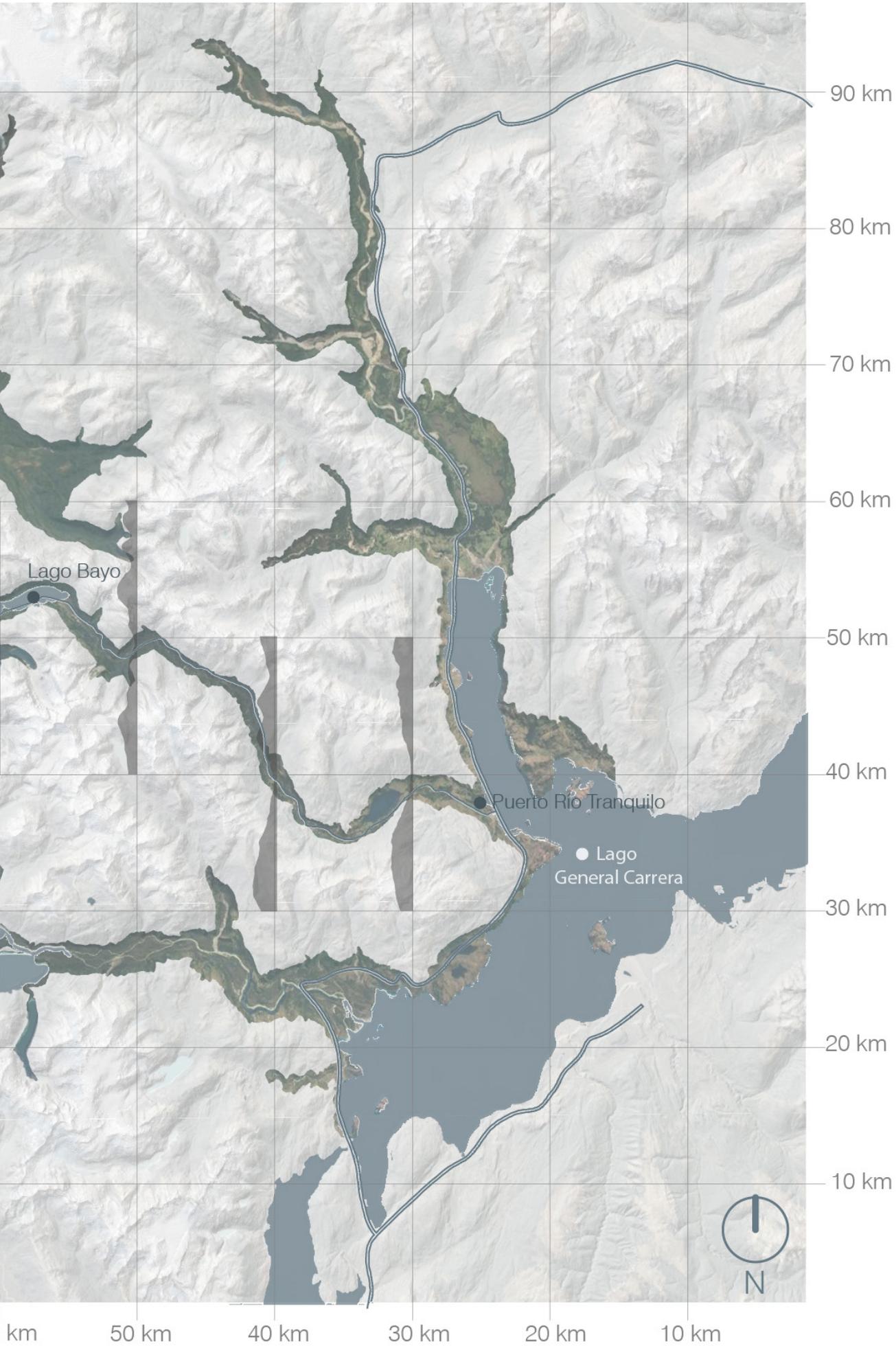
El lugar escogido para emplazar el proyecto es Puerto Grosse, lugar terminal de un camino de autos que viene desde Puerto Río Tranquilo. Es por este camino por donde se accede al Parque y desde Puerto Grosse donde se embarcan lanchas con turistas hacia Laguna San Rafael. Además, desde este mismo puerto salen lanchas hacia la Estación de Investigación de la Universidad Católica que tienen en Bahía Exploradores. Debido a su condición de lugar terminal donde se reúne gente se escoge Puerto Grosse como lugar de proyecto donde construir una infraestructura para el público que se reúne acá.

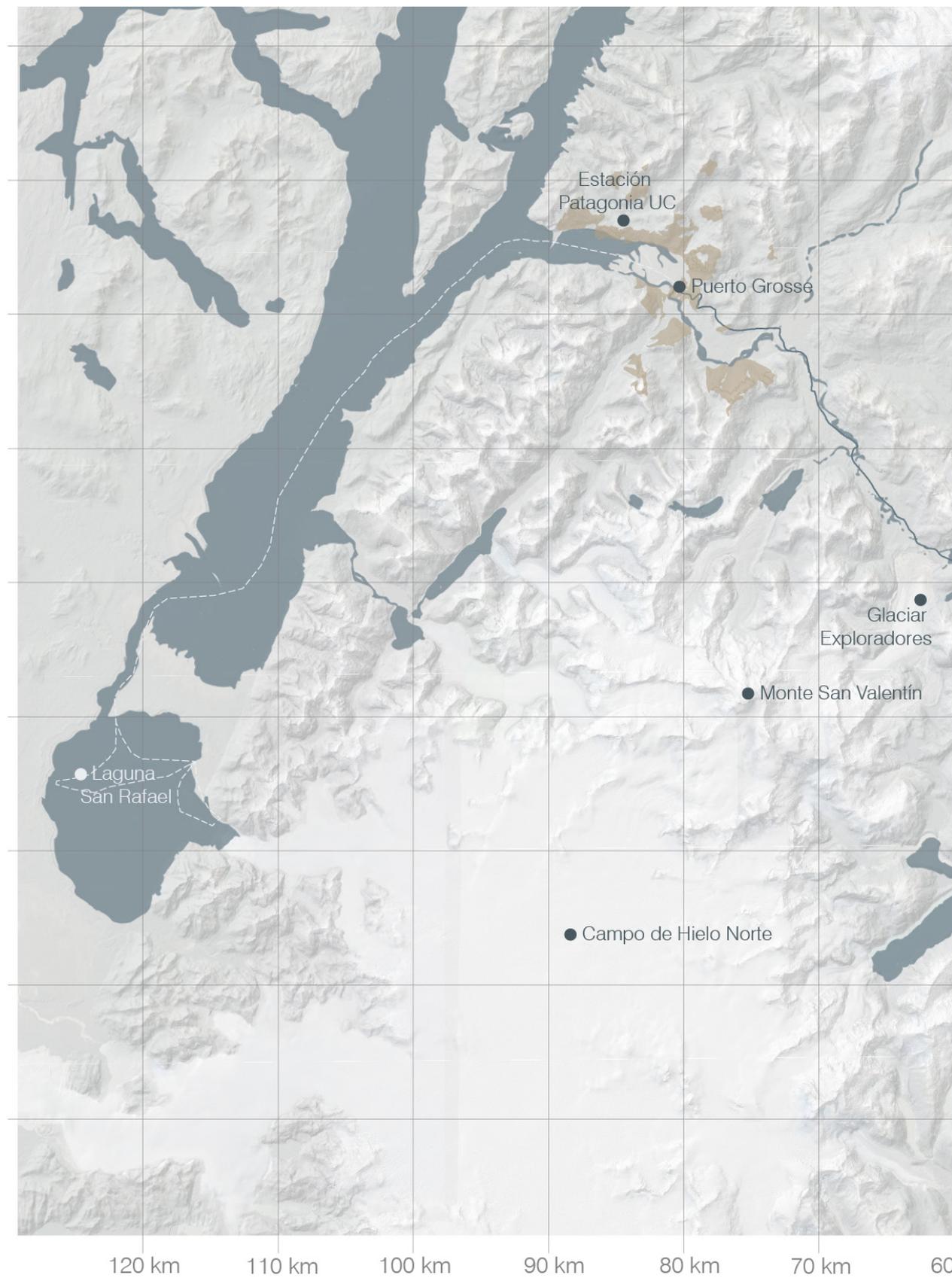
El proyecto se propone como una pieza articuladora, funcionando como conexión entre lo terrestre y lo marítimo que logre ordenar las preexistencias del lugar (figura 54).

<sup>16</sup> Pérez Oyarzún, F. (2007). Forma, materia, uso y lugar. En F. Pérez Oyarzún, A. Aravena, & J. Quintanilla, Los hechos de la arquitectura. Santiago, Chile: Ediciones ARQ.



**Figura 46.** Plano Valle Exploradores. Elaboración propia.





● Distritos Censales Región de Aysén INE 2014 Yy su respectiva población

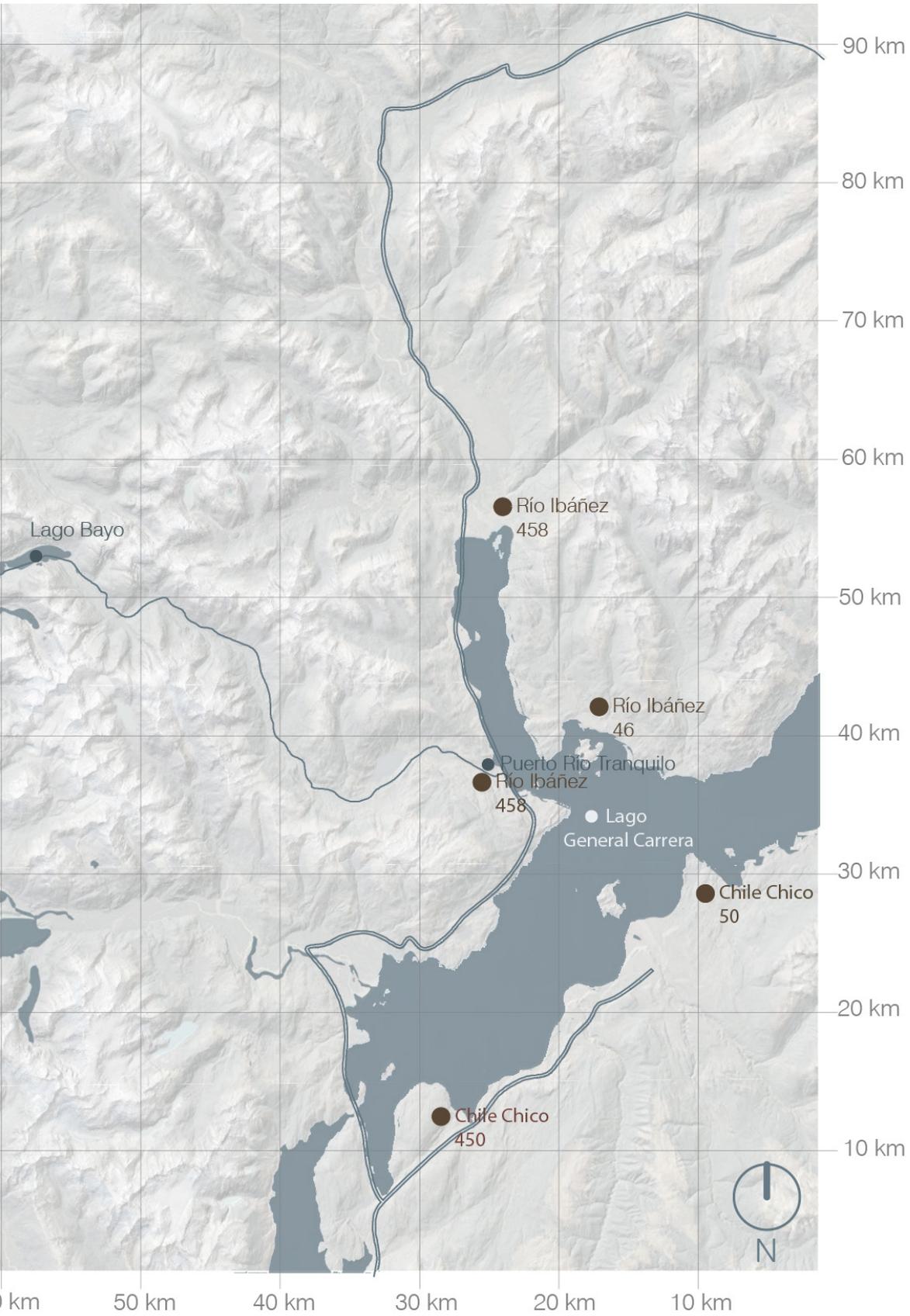
■ Cuenca Visual desde Puerto Grosse

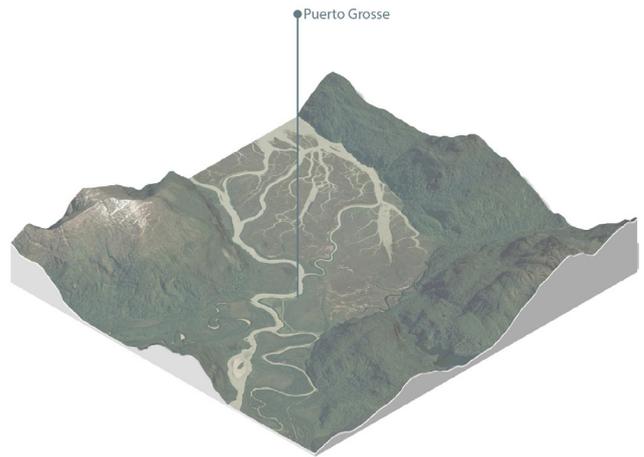
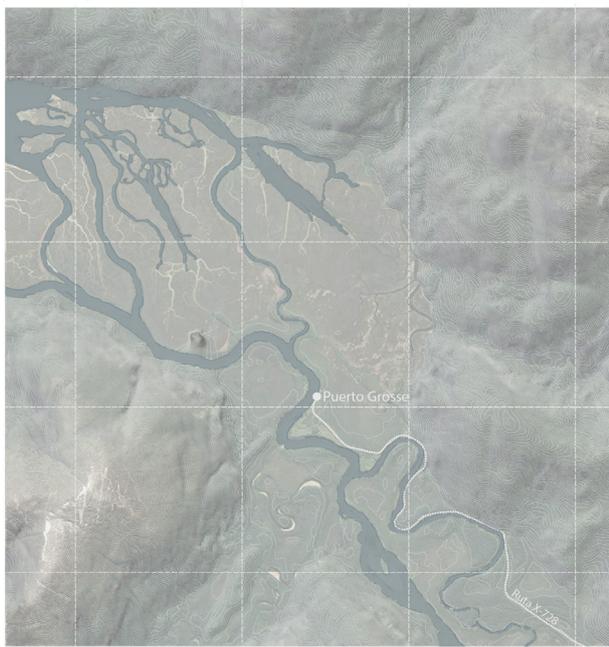
--- Ruta Navegable (recorrido de Puerto Grosse a Laguna San Rafael)

— Ruta X-728 (camino vehicular de 2 horas de Puerto Río Tranquilo a Puerto Grosse)

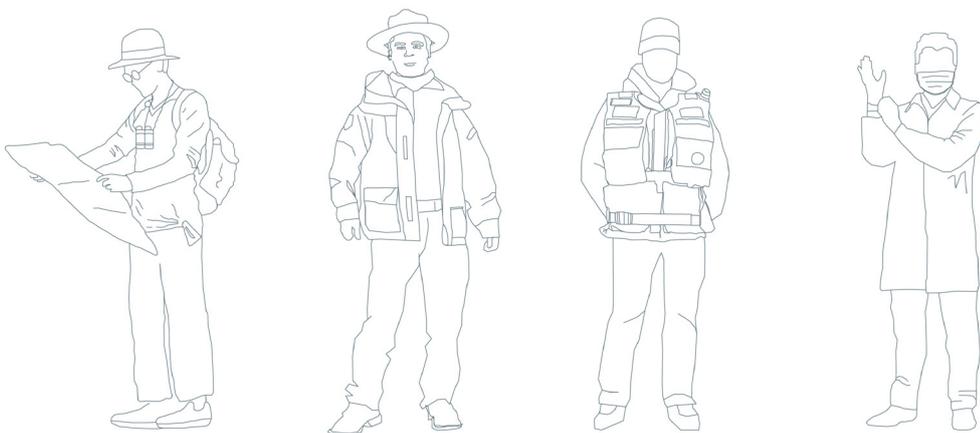
==== Ruta 7 (3 horas y media por carretera desde Coyhaique (Aeropuerto) hasta Puerto Río Tranquilo)

**Figura 47.** Plano caminos y Población Valle Exploradores. Elaboración propia.





**Figura 48.** Emplazamiento Puerto Grosse. Elaboración propia.



**Figura 49.** Usuarios Proyecto. Elaboración propia.

### 6.2.3 Condiciones climáticas

Nos encontramos en una zona con alta pluviometría por lo cual se hace necesario un espacio techado donde permanecer y resguardarse de la lluvia. Asimismo, se busca aprovechar esta condición lluviosa para recolectar aguas lluvias, teniendo un sistema que provee de agua las instalaciones del lugar. “El clima es frío templado y húmedo, con una temperatura media anual de 9,1 ° C, mínima media de 2,0 ° C - en julio- y máxima media de 19,2 ° C - en enero. La precipitación media anual es de 2000 mm y está distribuida a lo largo de todo el año. Esta aumenta con la elevación y la media anual es de 3000 mm en el Glaciar Exploradores.”<sup>17</sup>

El techo se propone con tableros de material micelial, de esta manera el material queda alejado del suelo, evitando la destrucción mecánica.

## 6.3 Uso

### 6.3.1 Descripción de los usos

Se propone un centro de visitantes y exposición del lugar, así como educación sobre los hongos de la zona y los materiales que pueden producirse con ellos.

La propuesta busca ordenar el lugar definiendo límites y entregando infraestructura para sus usuarios visitantes y de trabajo. Los edificios, al estar conformados por materiales a base de micelio, traen consigo un atractivo al parque y un fuerte mensaje de las necesidades de construir con biomateriales, debido a sus características de fabricación que resultan beneficiosas para el medioambiente (material con un ciclo de vida circular, baja coste de energía y no contaminantes).

<sup>17</sup> Bañales-Seguel, Camila Seguela. Salazar, Alejandro. Mao, Luca. 2019. “Hydro-morphological characteristics and recent changes of a nearly pristine river system in Chilean Patagonia: The Exploradores river network” *Journal of South American Earth Sciences*, No. 98

### 6.3.2 Usuarios

- Turistas: gente que visita el Valle Exploradores y en algunos casos desea embarcarse hacia la Laguna San Rafael desde Puerto Grosse. Este tipo de usuario necesita un lugar donde llegar, un lugar de información y educación del lugar, lugar de descanso y alimentación, lugar donde asistir a exposiciones y servicios como baños.
- Guardaparque: este tipo de usuario necesita oficinas, alojamiento, lugar de estar.
- Trabajador empresa Tour Laguna San Rafael: estos usuarios necesitan oficina donde vender tickets para las expediciones y un muelle donde embarcar.
- Científicos: se propone que estos usuarios investiguen los hongos del lugar, recolectando sustrato del mismo lugar como podría ser viruta de madera para investigar la creación de materiales de micelio en el lugar mismo. Para esto necesitan un laboratorio donde fabricar los materiales y un lugar de alojamiento.

“La arquitectura se entrecruza más que ninguna otra de las artes con el quehacer humano, con su realidad cotidiana y con su historia. No se trata por tanto de una condición adicional, sino del propio modo de ser de la arquitectura. Su forma y su modo de acción se dan en ese contacto estrecho con la actividad humana.”<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Pérez Oyarzún, F. (2007). *Forma, materia, uso y lugar*. En F. Pérez Oyarzún, A. Aravena, & J. Quintanilla, *Los hechos de la arquitectura*. Santiago, Chile: Ediciones ARQ.



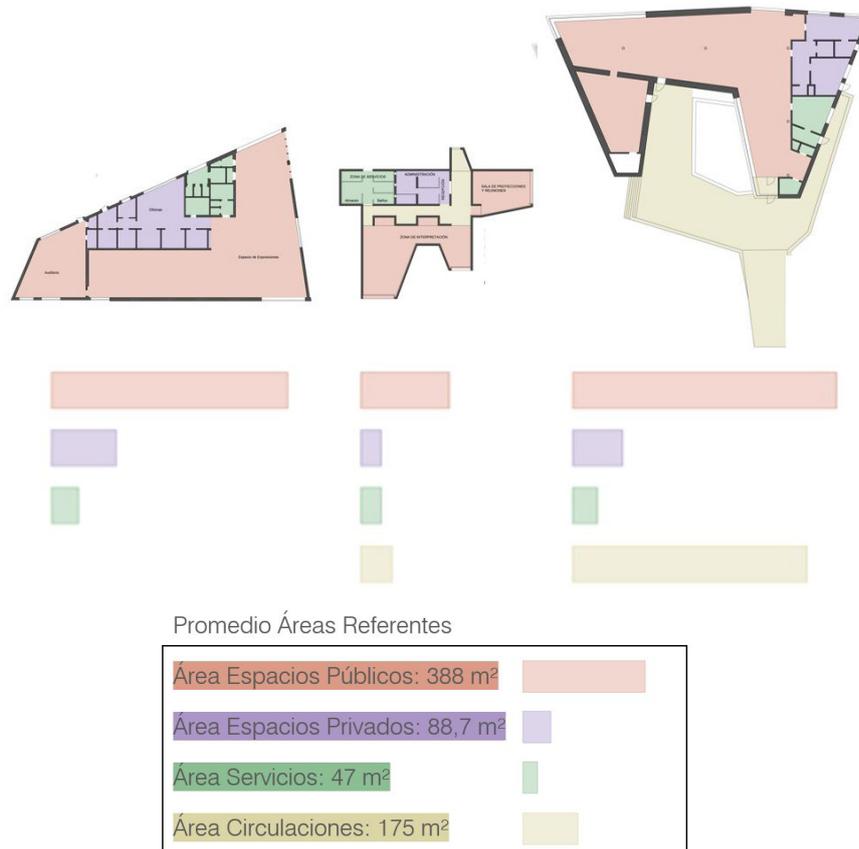
**Figura 50.** Gaete, J. (2021, 7 octubre). naturum Kosterhavet / White Arkitekter. ArchDaily.



**Figura 51.** Vial, C. J. (2019, 24 octubre). Centro de Interpretación del Parque Natural Los Calares del Mundo y de la Sima / Manuel Fonseca Gallego. Plataforma Arquitectura.



**Figura 52.** Aguilar, C. (2019, 24 octubre). Naturum Tåkern / Wingårdhs. Plataforma Arquitectura.



**Figura 53.** Esquema promedio áreas referentes. Elaboración propia.

### 6.3.3 Referentes Programáticos

Para la definición de programas se realiza un estudio de referentes programáticos, dónde se analiza el área destinada para los distintos usos en tres proyectos de carácter similar al propuesto.

**-Naturum Kosterhavet:** centro de visitantes sueco, funciona como centro de información y lugar de exhibición ubicado en la isla de Syd-koster, la cual es reserva natural.

Este proyecto contiene espacios de exposiciones, sala de conferencias y oficinas para el personal administrativo del parque. Es un proyecto que fue diseñado para el efecto medioambiental mínimo y cumple altas exigencias relacionadas con el consumo de energía y los materiales de construcción saludables.

**-Centro de Interpretación del Parque Natural Los Calares del Mundo y de la Sima:** ubicado en Yeste, España. El programa incorpora Sala de Interpretación y Sala de Proyecciones y reuniones. Se decide situar el edificio en la parte más alta de la zona para disfrutar de las vistas del parque

**-Centro de visitantes Naturum Tåkern:** en este proyecto se busca realzar la experiencia de la naturaleza para los visitantes. Es un edificio con techo de paja posee un pliegue para formar un cuarto al aire libre abierto a los pájaros y al cielo. Los pliegues generan formas orgánicas que se encuentran en este entorno natural.

En la figura 53 se muestra un promedio de áreas según sus usos, de los tres referentes estudiados

### 6.3.4 Superficie programas

A continuación, se desglosa el programa y los metros cuadrados destinados a cada recinto:

- Centro de visitantes y biomateriales
- Oficina venta de tickets. (30 m<sup>2</sup>)
  - Baños y servicios (50 m<sup>2</sup>)
  - Zona educativa del lugar, hongos de la zona y materiales a base de micelio (150 m<sup>2</sup>)
  - Auditorio (65 m<sup>2</sup>)
  - Muelle
  - Cafetería (150 m<sup>2</sup>)
  - Alojamiento de guardaparques y científicos (80 m<sup>2</sup>)
  - Bodegas botes y lanchas(300m<sup>2</sup>)
  - Laboratorio
  - Estacionamientos
  - Circulaciones



**Figura 54.** Imagen aerea Puerto Grosse con preexistencias (Imagen tomada de Google Earth).



**Figura 55.** Imagen Puerto Grosse tomada de Diario El Divisadero. (2021, 12 enero). MOP mejorará muelle de Bahía Exploradores y acceso al muelle de Puerto Tranquilo. <http://www.eldivisadero.cl/noticia-61118>

## 6.4 Forma

Para introducir el desafío de la forma, vale la pena reproducir algunas palabras de Alberto Campos Baeza, quien señala: “Cuando digo que la gravedad construye el espacio, estoy hablando de la estructura, de la llamada estructura portante. De la estructura que a lo largo de la Historia ha generado la forma arquitectónica. Casi siempre la forma de la arquitectura ha ido, lógicamente, ligada a la estructura portante. Es más, estructura y forma y espacio, han sido siempre la misma cosa. (...) la estructura portante, más que sólo transmitir las cargas del edificio a la tierra por causa de la ineludible gravedad, lo que verdaderamente transmite es el orden del espacio, establece el orden del espacio, construye el espacio. (...) estructuras no sólo transmitían las cargas, sino que, además, lo más importante, establecían el orden del espacio. Y este orden del espacio está desde el primer momento en la génesis de cualquier proyecto. Como el esqueleto en el cuerpo humano. Recuerdo cómo Alejandro de la Sota, el maestro, nos explicaba esto en aquellas clases iniciáticas: “¿Se imaginan ustedes que cuando nace un niño su madre exclamara ¡se han olvidado el esqueleto! ¿Y hubiera que abrir en canal a la criatura para introducirle el óseo esqueleto? “. Pues con aquellos clarísimos ejemplos Sota trataba de convencernos de cómo tanto la Estructura como las Instalaciones, tenían que estar desde el principio en la Idea del Proyecto. Lo que llamábamos unidad del hecho proyectual. La estructura, la estructura portante era por tanto no sólo la transmisora de las cargas de la Gravedad sino, sobre todo, generadora del orden de la Arquitectura”<sup>19</sup>

## 6.5 Materia

Por su parte Fernando Pérez Oyarzún señala que: “Destacar los componentes matéricos de la arquitectura significa, en primer lugar, atender al modo global y no puramente visual en que nos afecta. La dimensión tectónica de la arquitectura pone de relieve su condición táctil, auditiva u olfativa. La muestra afectada por el paso del tiempo y testigo de las operaciones constructivas que la llevaron a cabo. Significa también pensarla como estructura, esto es como un problema de equilibrio y resistencia: como acción de pesos y de esfuerzos.”<sup>20</sup>

A partir de lo dicho, se plantea el paradigma de la economía circular: se proponen edificios de madera con un sistema de fácil ensamblaje y desensamblaje con un techo conformado por el componente propuesto.

Se busca eficiencia en la producción y construcción utilizando la prefabricación de piezas y pensando siempre en el ciclo de vida del proyecto: una vez que el edificio cumple su vida útil se desarma para reutilizar sus partes y los paneles de micelio se degradan en el mismo lugar. Se reemplazan las aislaciones de poliuretano y poliestireno expandido, que suelen ser muy contaminantes, por paneles de micelio que cumplen la misma función.

En la figura 56 se muestra una tabla con fuentes de datos sobre el impacto de los materiales de construcción en base a la guía de construcción sostenible de ISTAS.

<sup>19</sup> Campo Baeza, A. (2009). La estructura de la estructura. En *Pensar con las manos*. Nobuko.

<sup>20</sup> Pérez Oyarzún, F. (2007). Forma, materia, uso y lugar. En F. Pérez Oyarzún, A. Aravena, & J. Quintanilla, *Los hechos de la arquitectura*. Santiago, Chile: Ediciones ARQ.

Tomando en consideración la tabla y el concepto de economía circular se proponen proyectos conformados de:

- Madera y uniones metálicas de manera de permitir un armado rápido y la posibilidad de reutilizar estos materiales en caso de desarmarse el edificio.
- Para las aislaciones de los edificios se propone paneles aislantes de micelio.
- Para las fundaciones en un caso se proponen pilotes de madera sobre un suelo apisonado y para el otro edificio se propone levantar el edificio sobre un zócalo conformado de gaviones de piedra del lugar.
- Ambos techos de los edificios se proponen con el componente de techo a partir de paneles de micelio propuesto sobre los cual se propone tratamientos de preservación a partir de aceite de linaza y una colada de cal.

Por último se piensa en el traslado de los materiales, los cuales pueden ser traídos, desde Puerto Montt vía marítima (en el caso de piezas más especializadas) y desde Coyhaique vía terrestre. Pensando siempre, en utilizar material de lugares cercanos, de manera de reducir la huella de carbono que generan los traslados.

Material	Efecto Invernadero	Acidificación	Contaminación atmosférica	Ozono	Metales pesados	Energía	Residuos sólidos
<i>Cerámica</i>	+	+	+	+	+	+	+++
<i>Piedra</i>	+	+	+	+	+	+	+++
<i>Acero</i>	++	++	+++	+	++	++	+
<i>Aluminio</i>	+++	+++	++	+	+++	+++	+
<i>PVC</i>	++	++	+++	+	++	++	++
<i>Poliéstereno</i>	++	+++	+++	++	+++	++	++
<i>Poliuretano</i>	+++	++	+++	+++	++	++	+
<i>Madera de pino</i>	+	+	+	+	+	+	+

+ Impacto pequeño    ++ Impacto medio    +++ Impacto elevado

**Figura 56.** Tabla impacto materiales. Tabla elaborada en base a información de la guía de construcción sostenible de ISTAS.

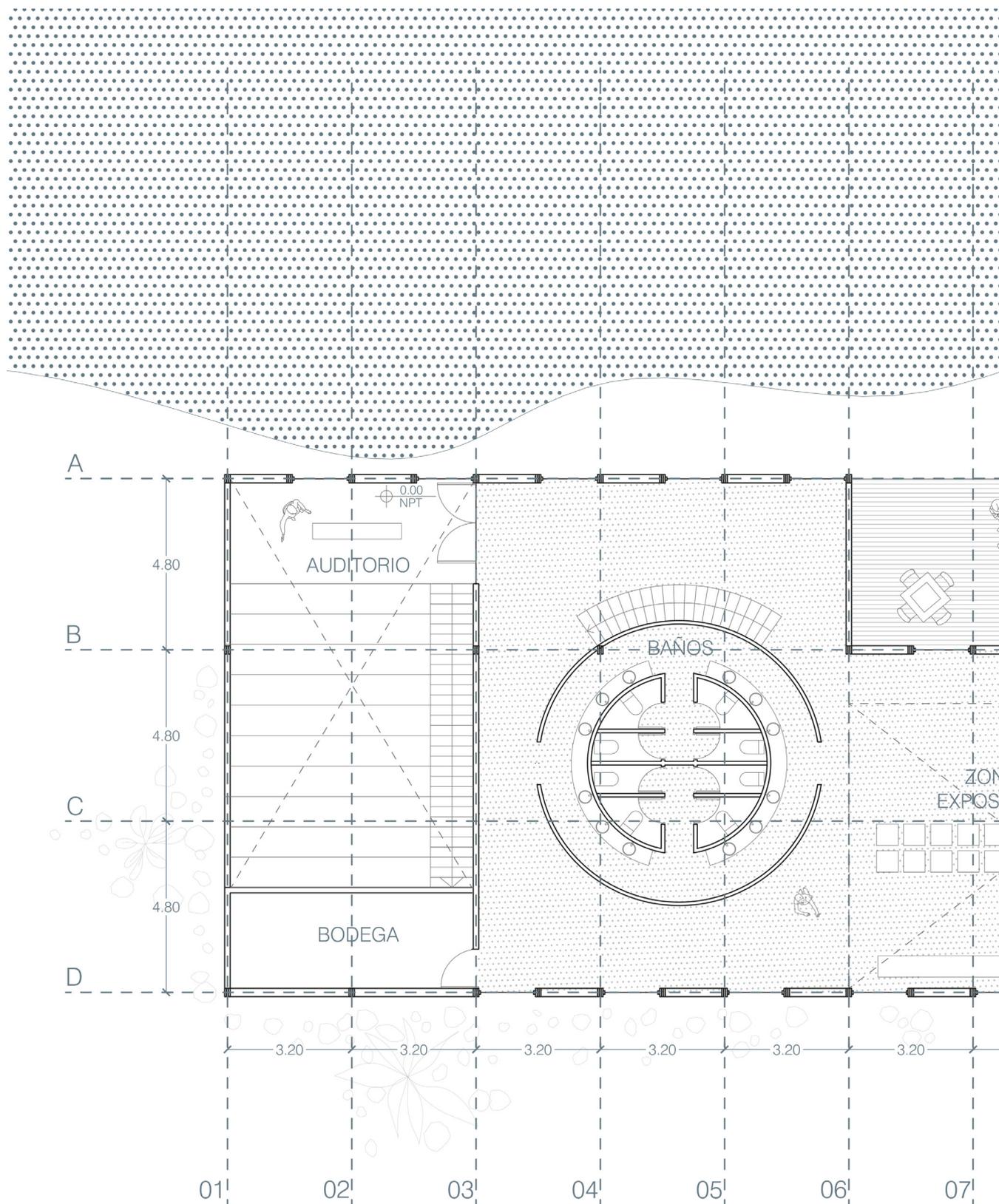


## 07 Anexos

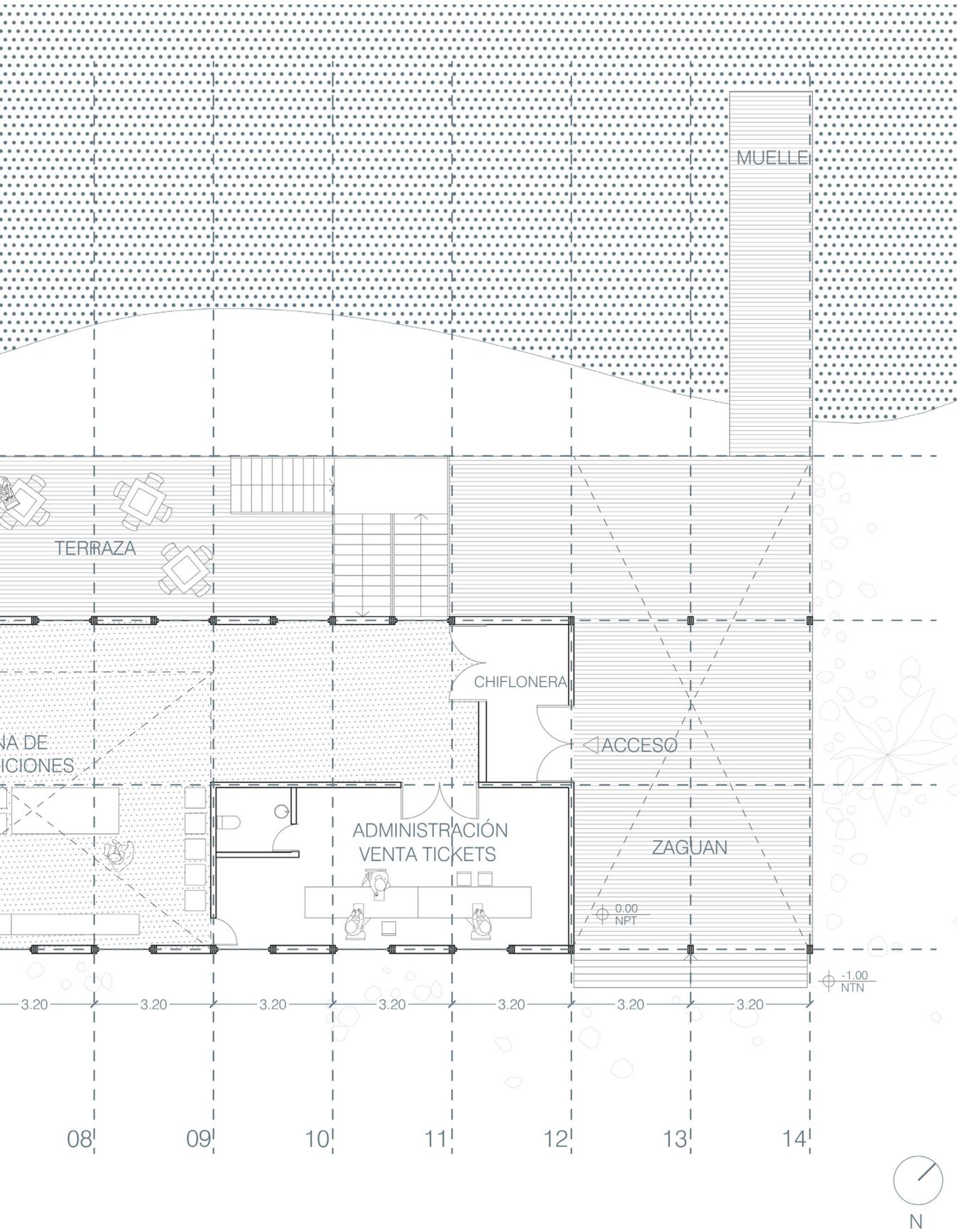
En los anexos se muestran las planimetrías de los dos edificios propuestos en Puerto Grosse. Cuando se habla de edificio río, nos referimos a un edificio emplazado con vista al río, el cuál es de caracter liviano, conformado por una estructura de madera sobre pilotes y con un techo de un agua. Este proyecto alberga los programas de muelle, administración, venta tickets a la laguna San Rafael, centro de exposiciones, cafetería, auditorio, baños y terraza techada.

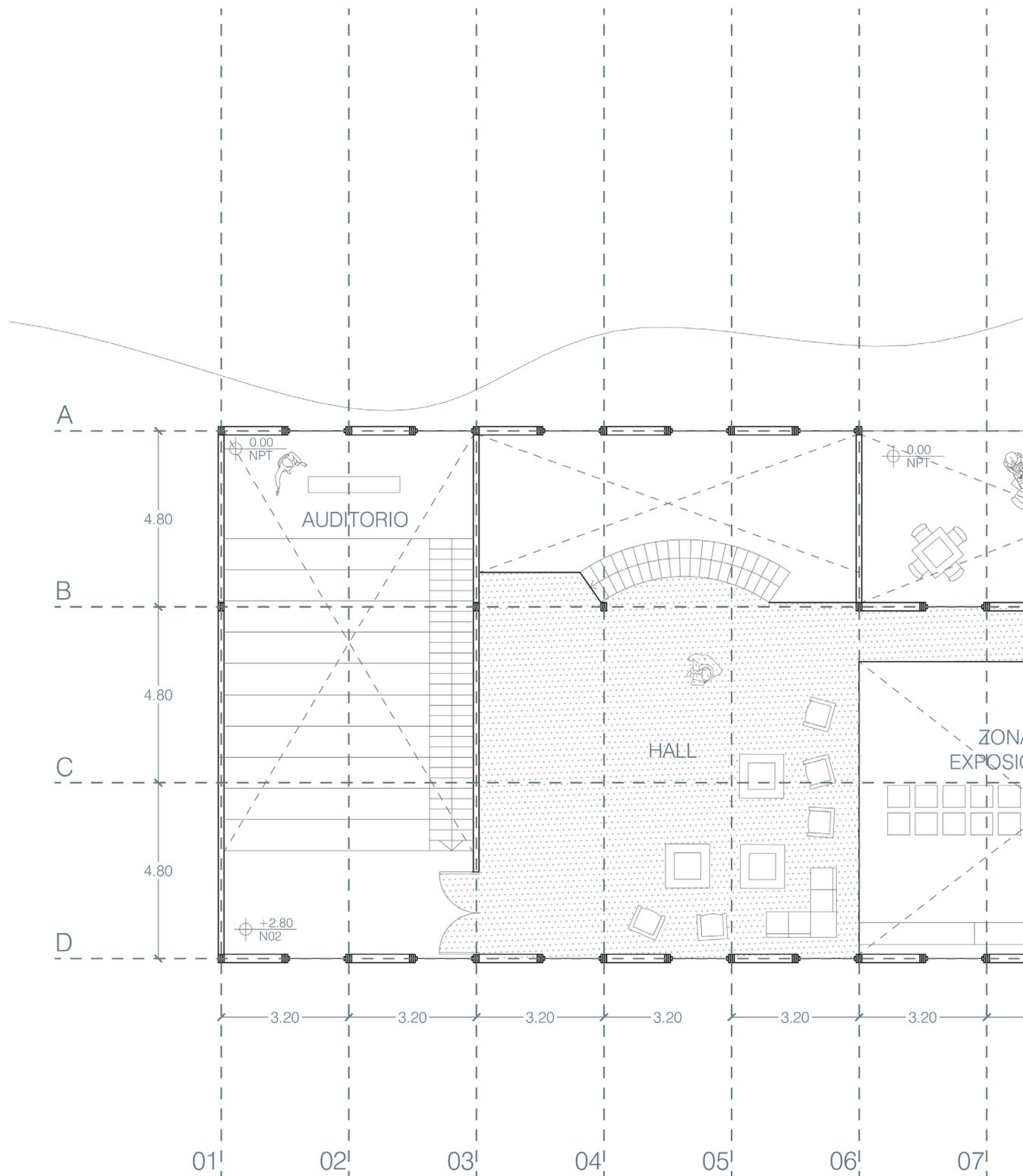
En el caso del edificio zócalo, nos referimos a un edificio con un zócalo de gaviones con piedras del lugar, sobre el cual se sostiene una estructura de madera con un techo a dos aguas. Este edificio posee un laboratorio de biofabricación de micelio y alojamiento para guardaparques y científicos.





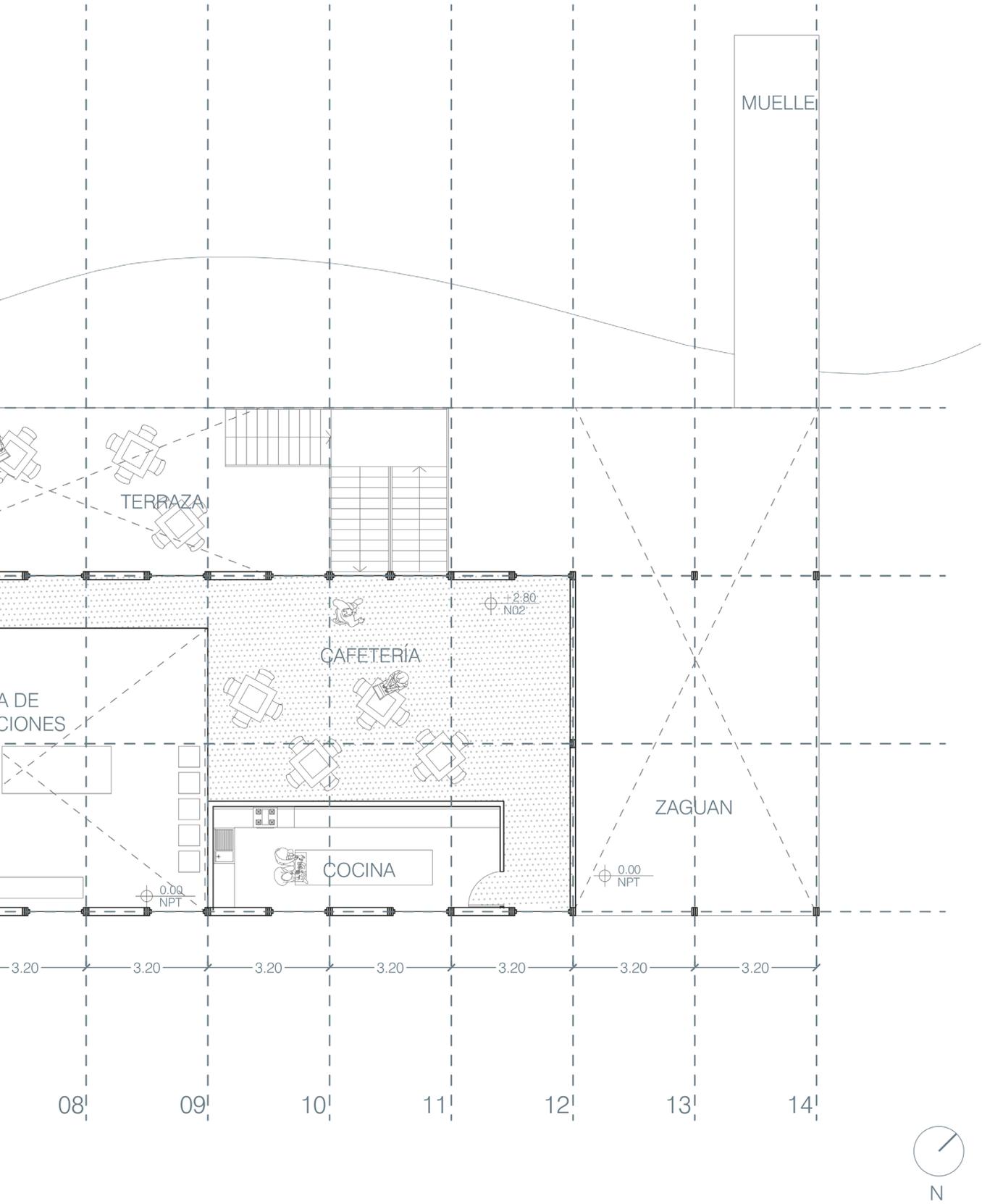
**Figura 57.** Planta Nivel 1 Edificio Río. Elaboración propia.



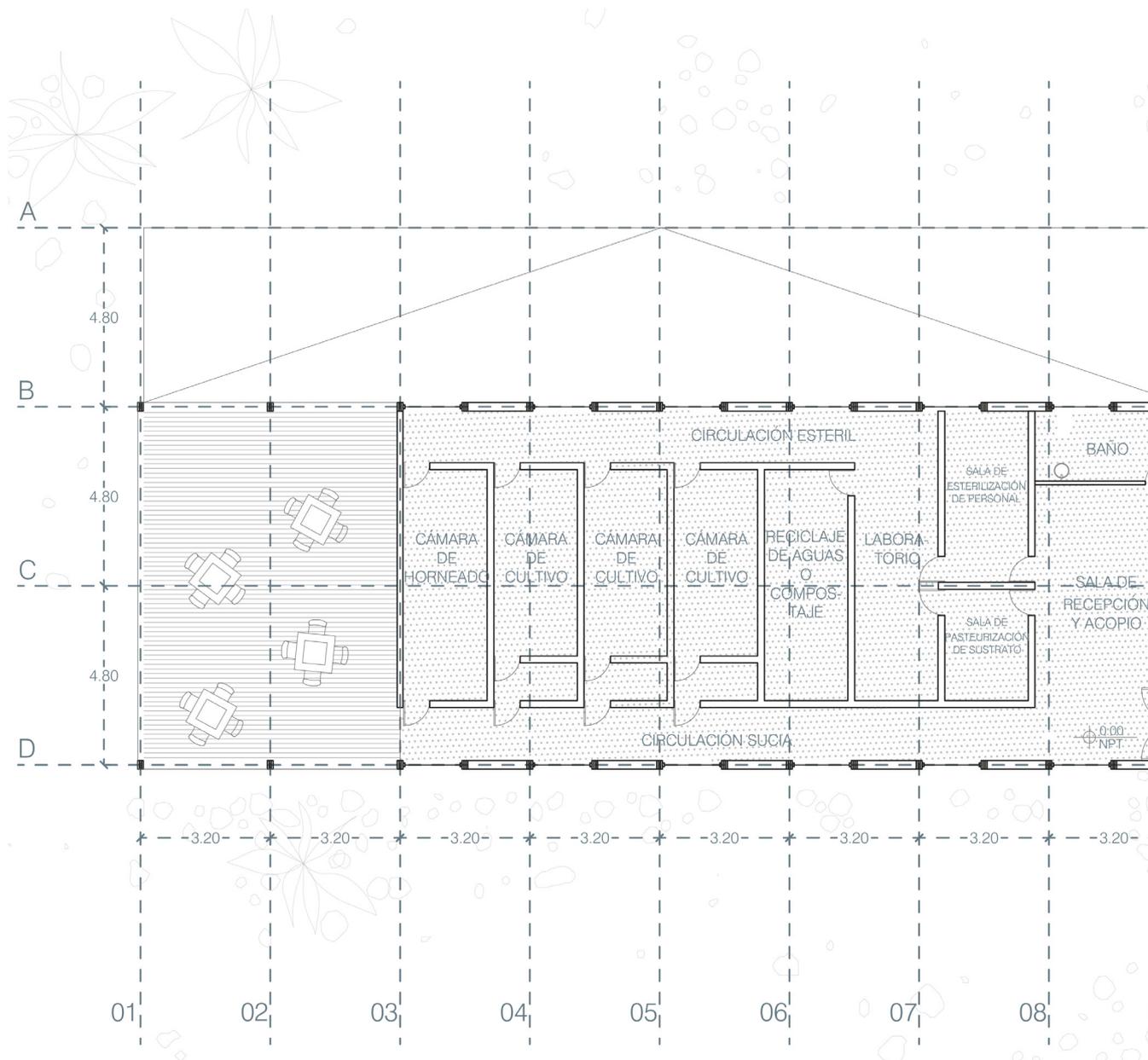


**Figura 58.** Planta Nivel 2 Edificio Río. Elaboración propia.

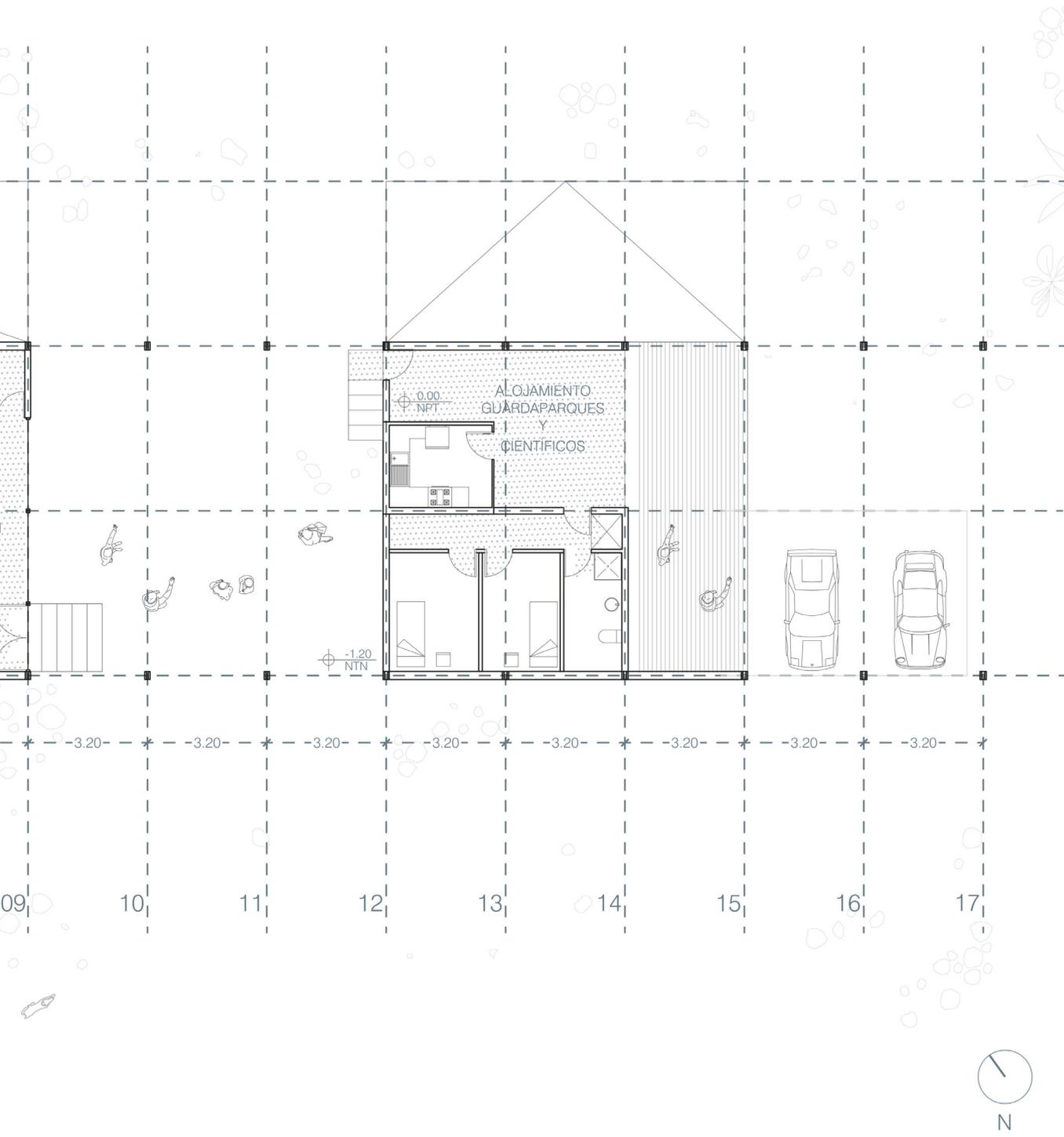
VALENTINA SOFÍA C

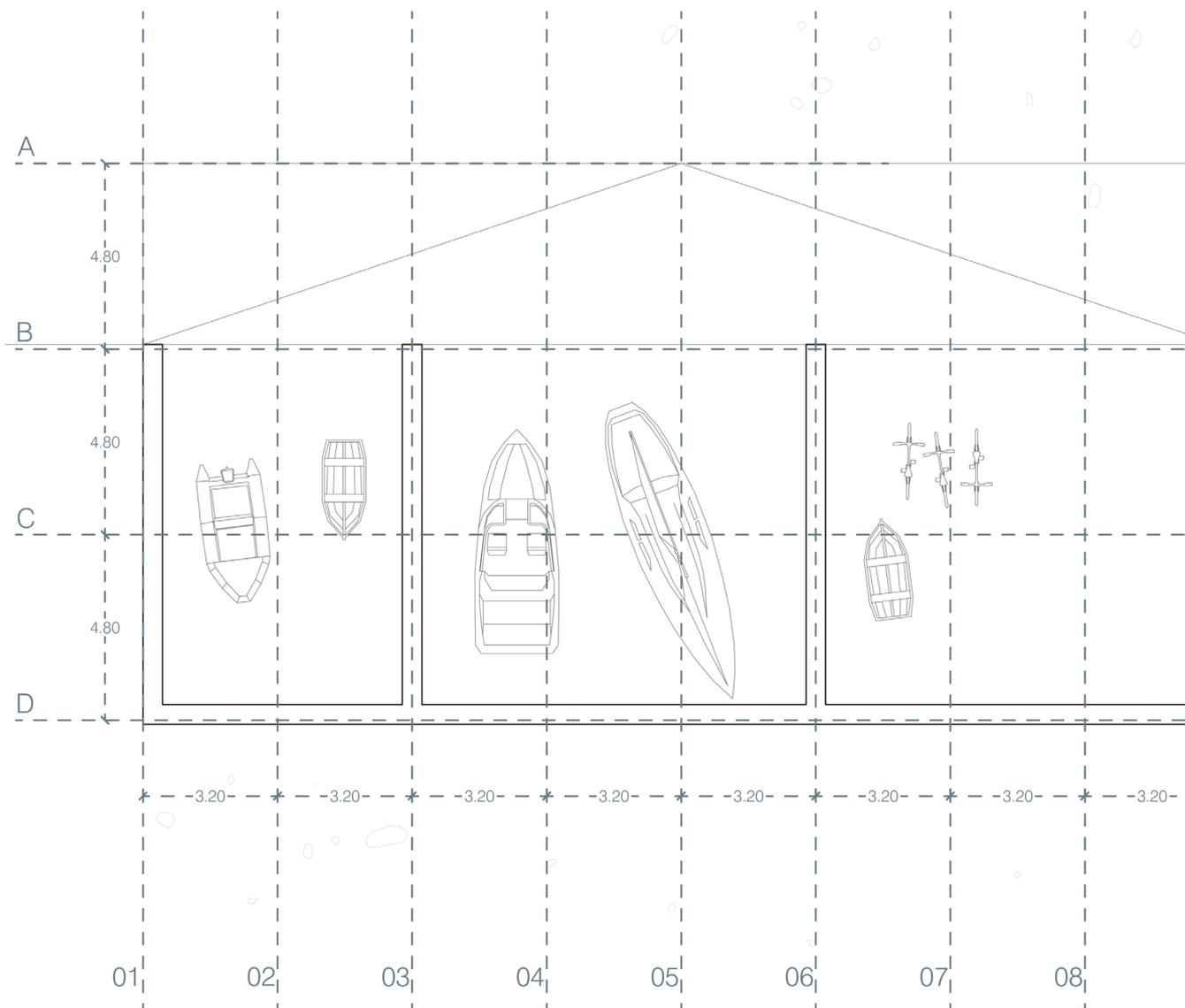


COLOMA HOHLBERG

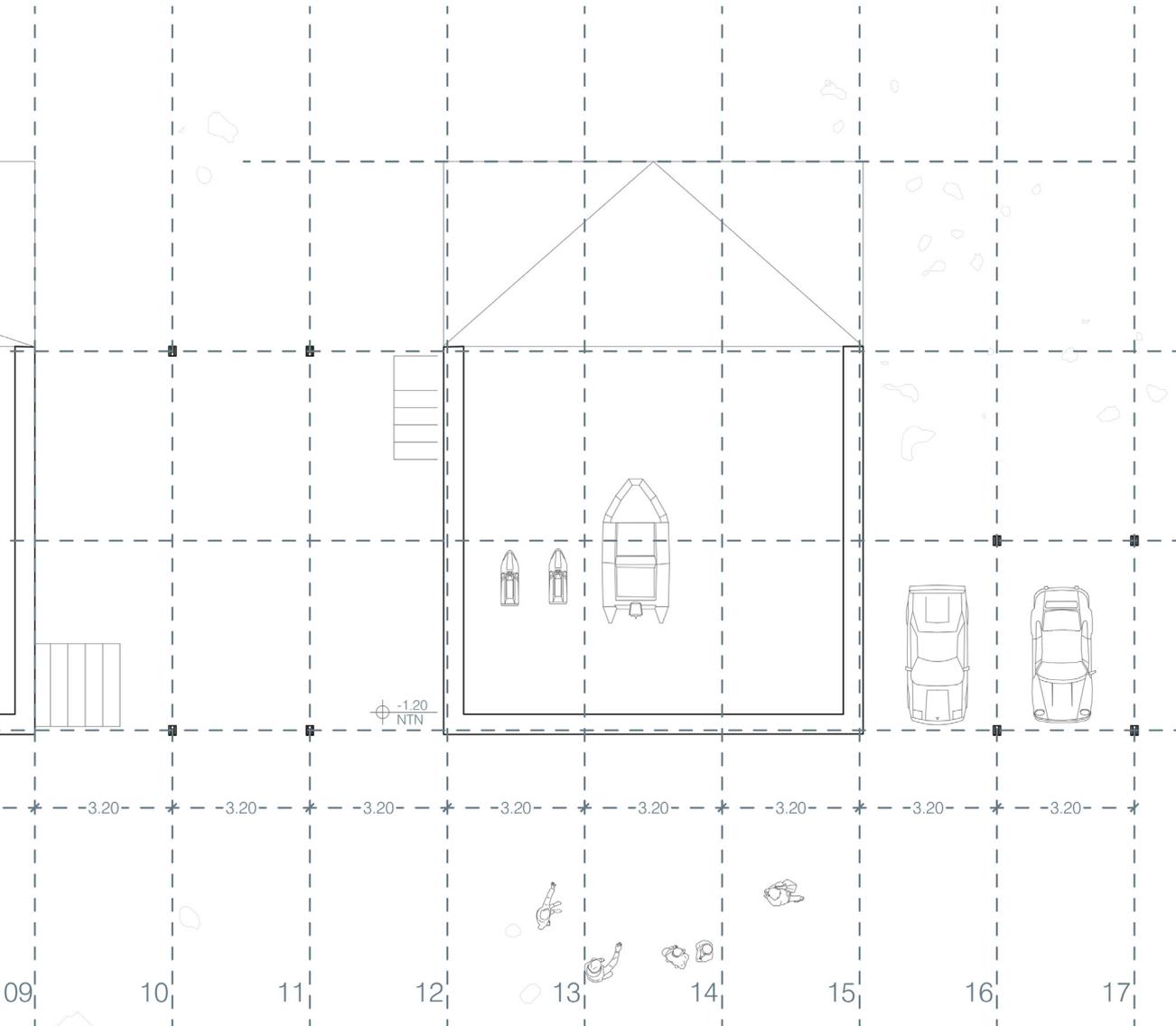


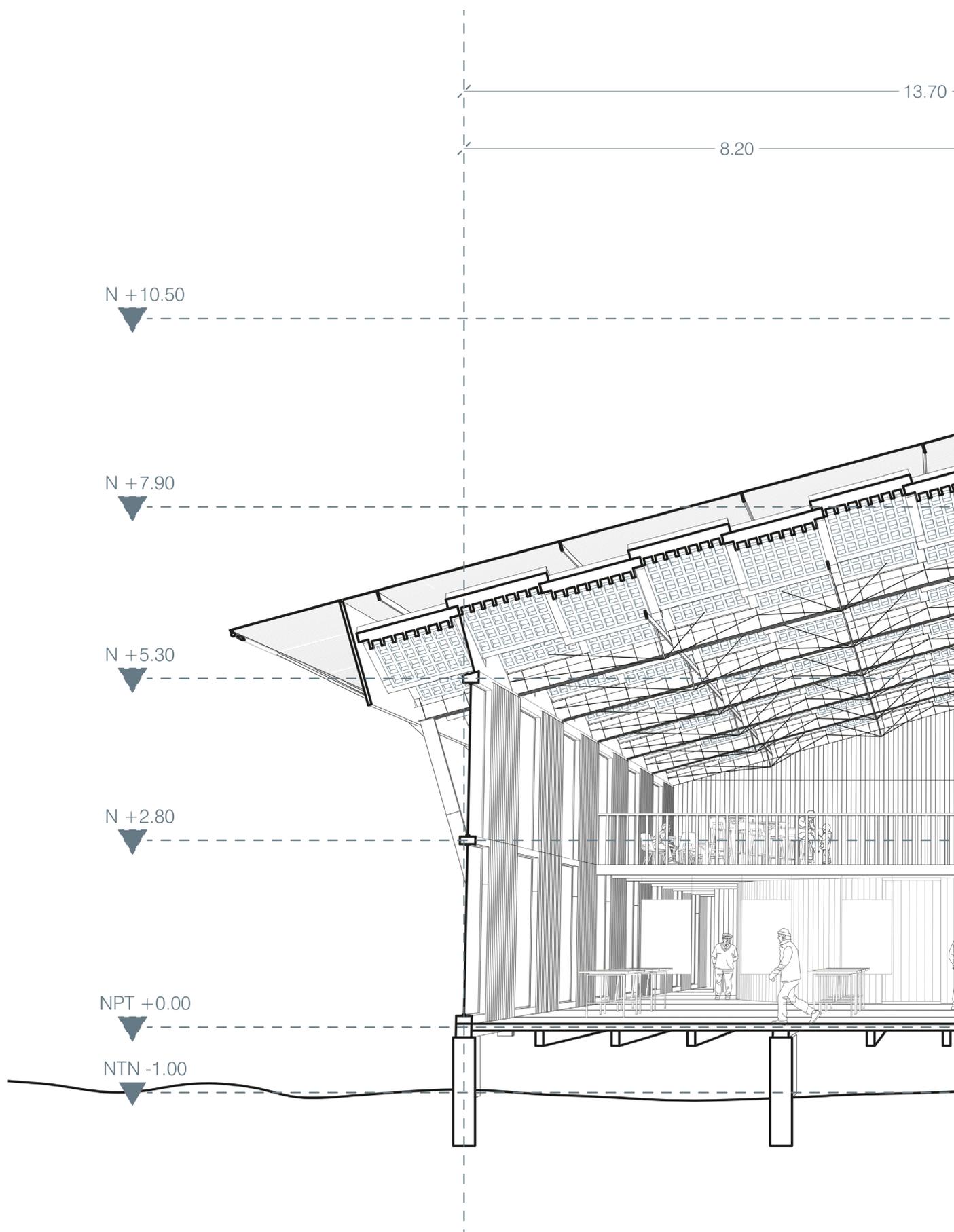
**Figura 59.** Planta Nivel 1 Edificio Zócalo. Elaboración propia.



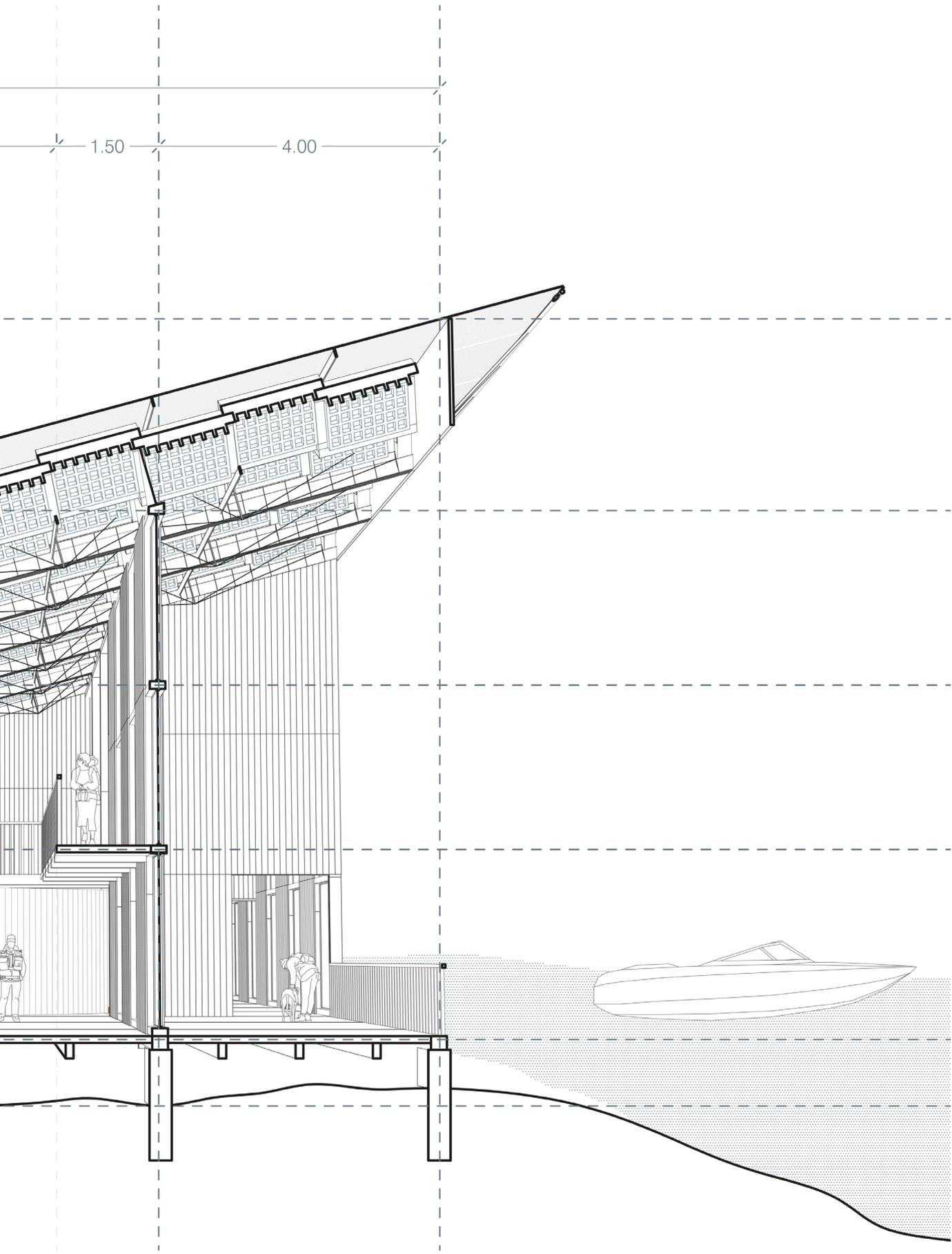


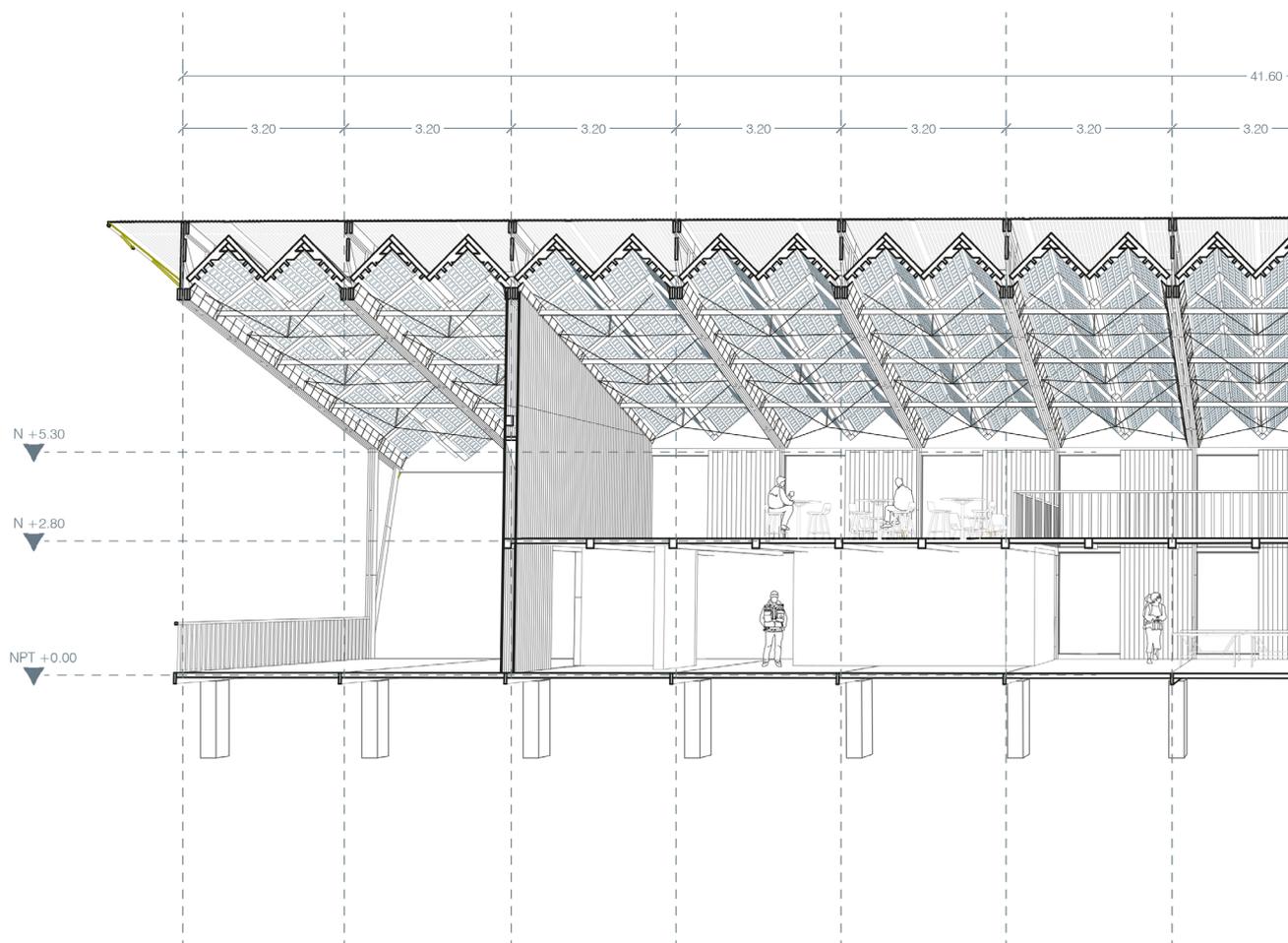
**Figura 60.** Planta Nivel -1 Edificio Zócalo. Elaboración propia.



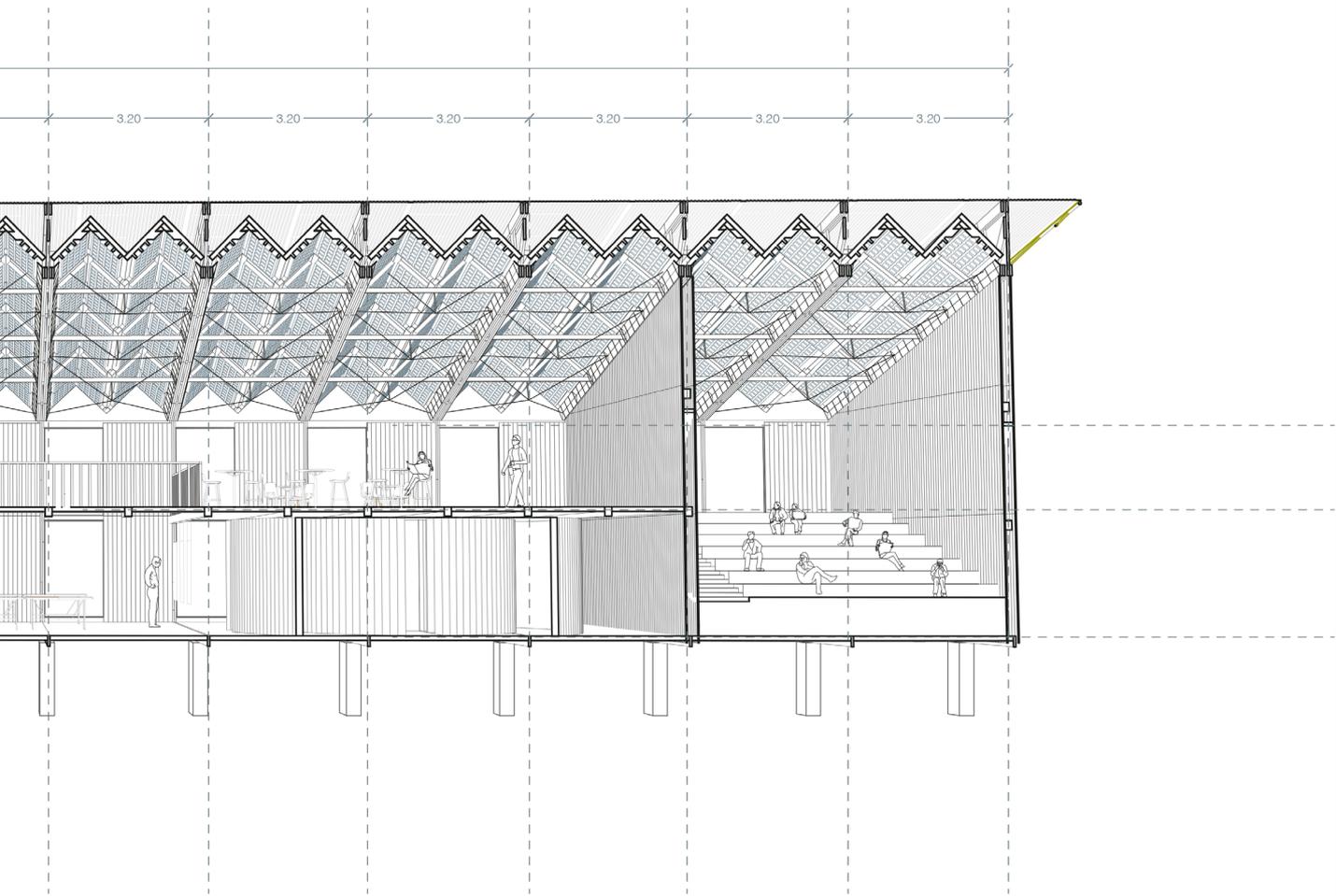


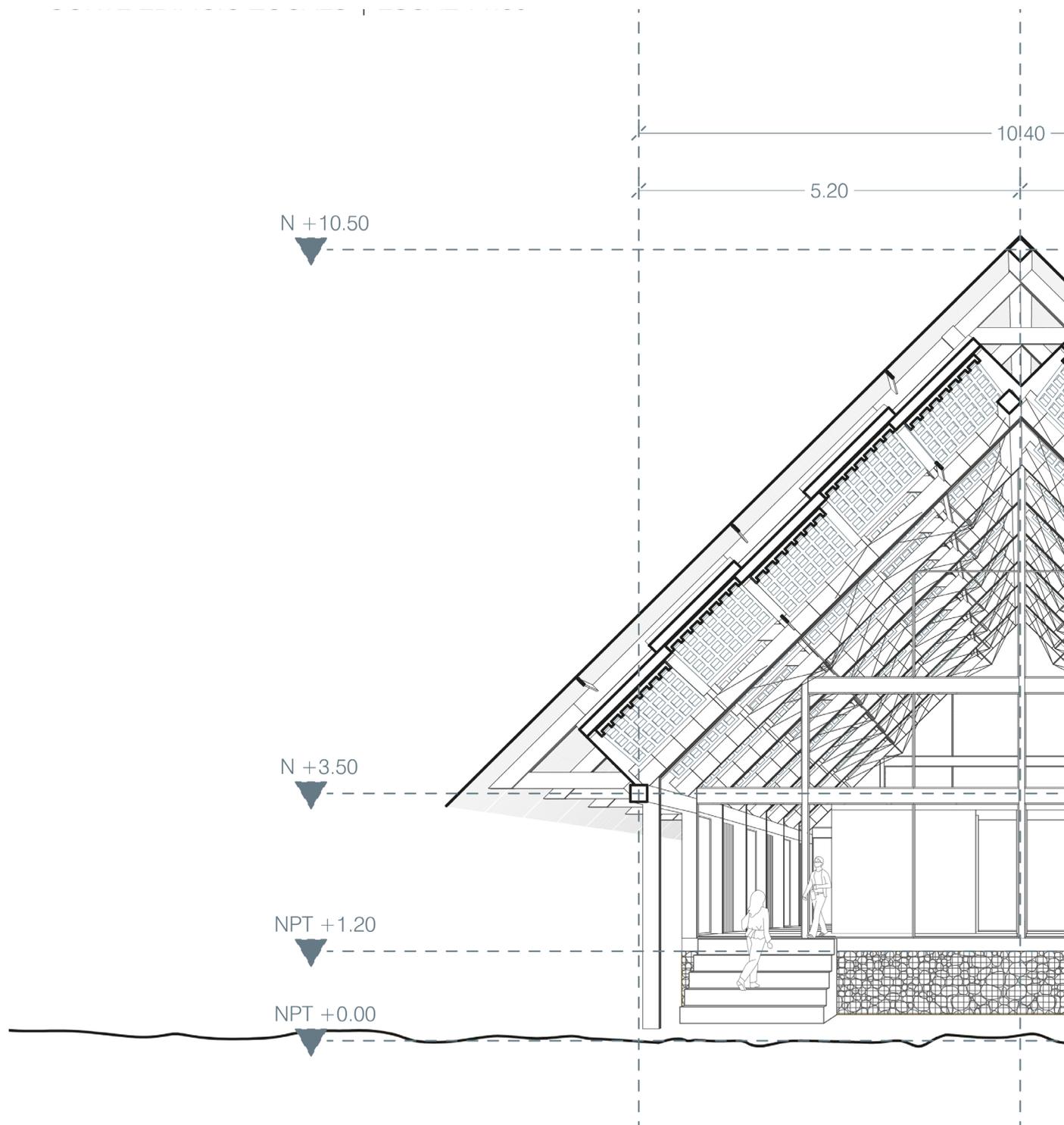
**Figura 61.** Corte Fugado Edificio Río. Elaboración propia.



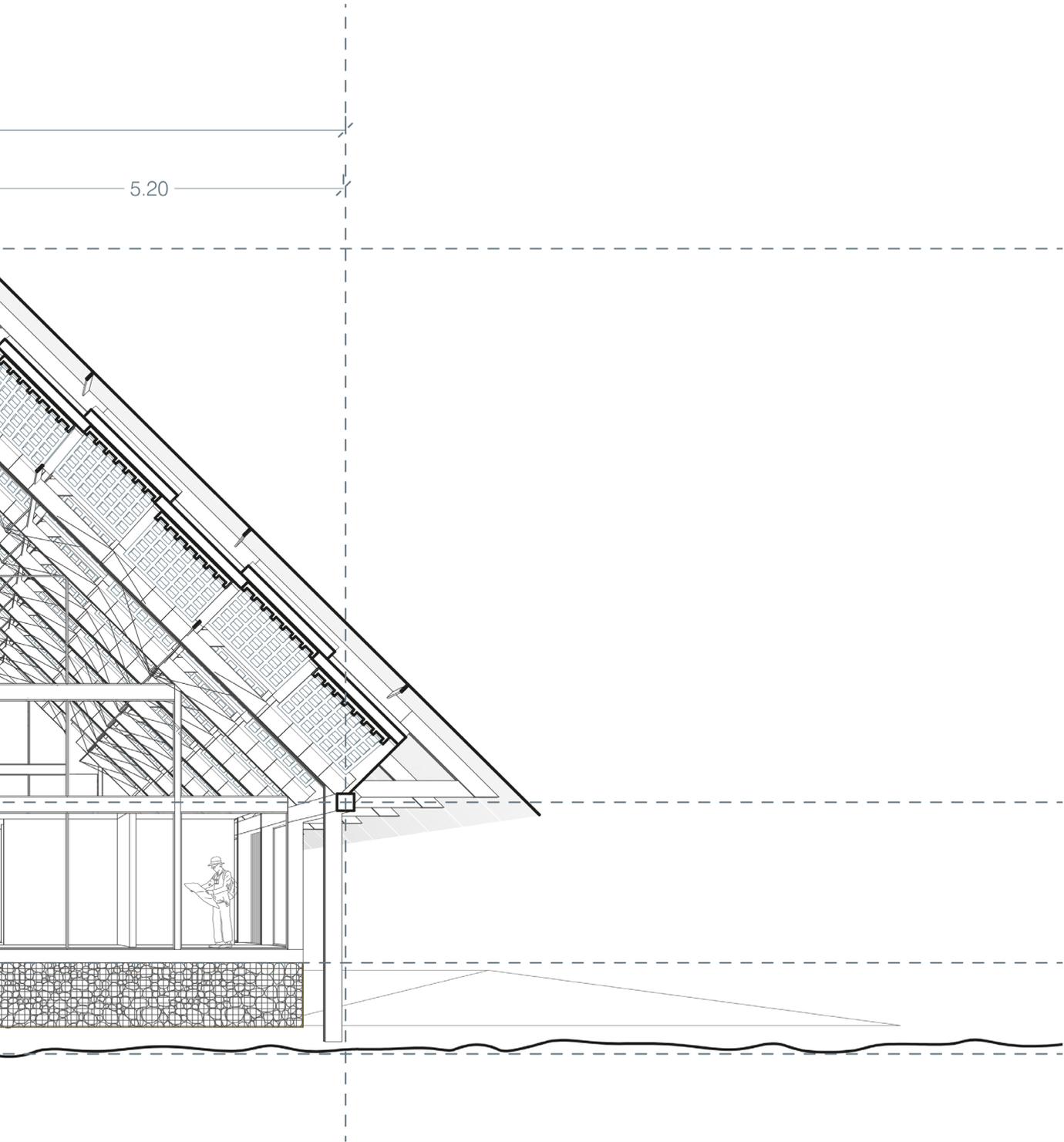


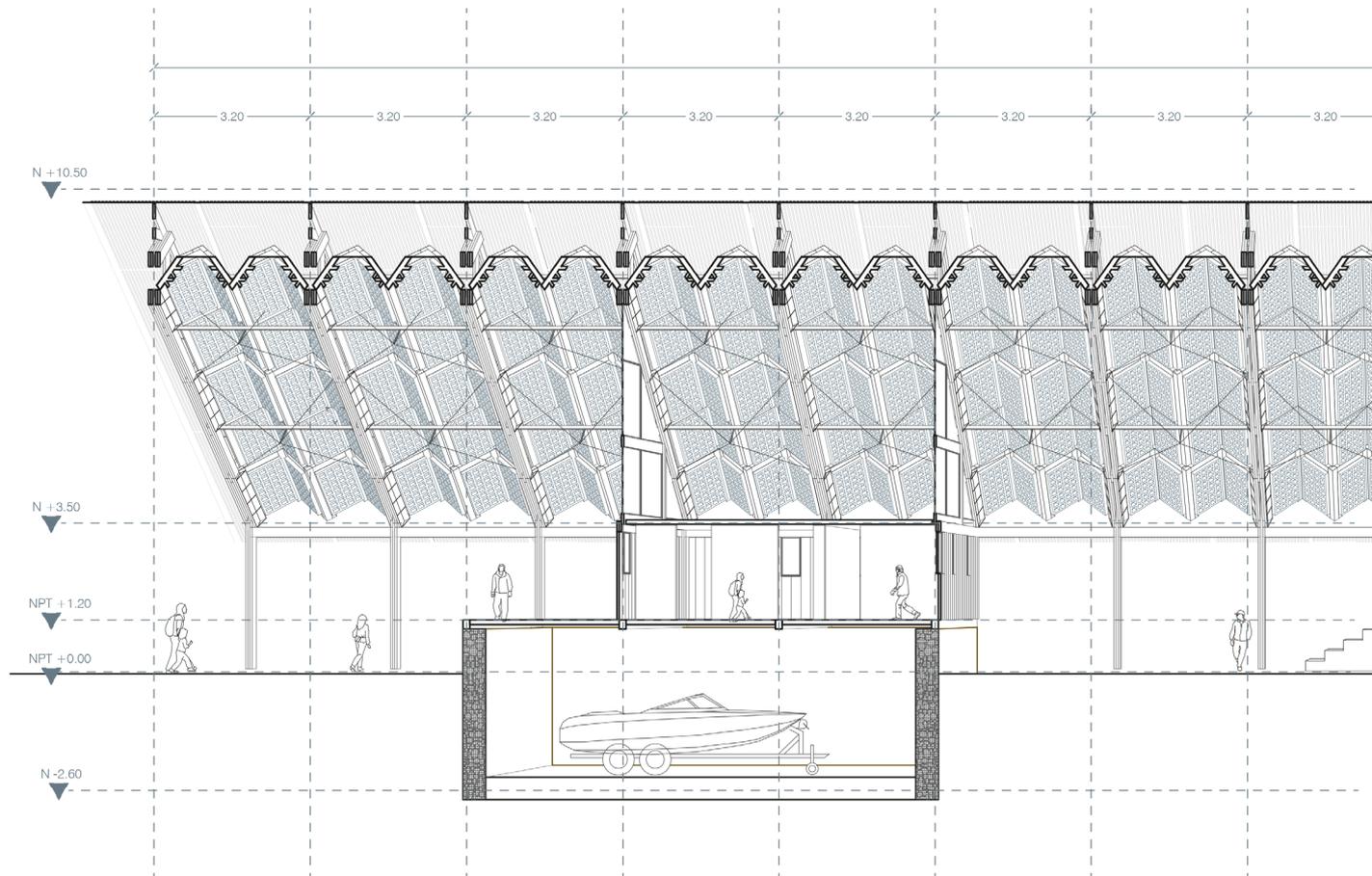
**Figura 62.** Corte Fugado Edificio Río. Elaboración propia.



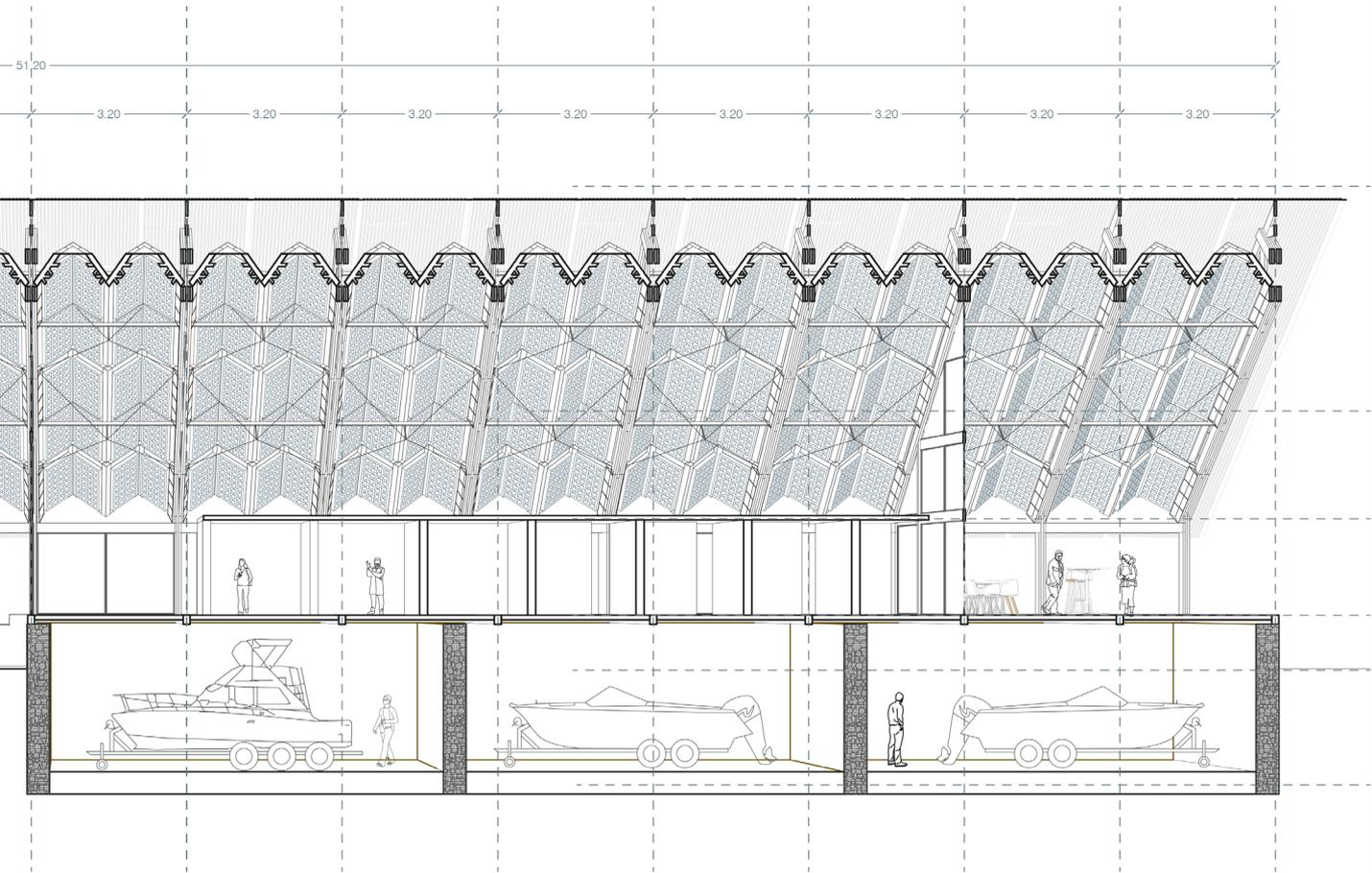


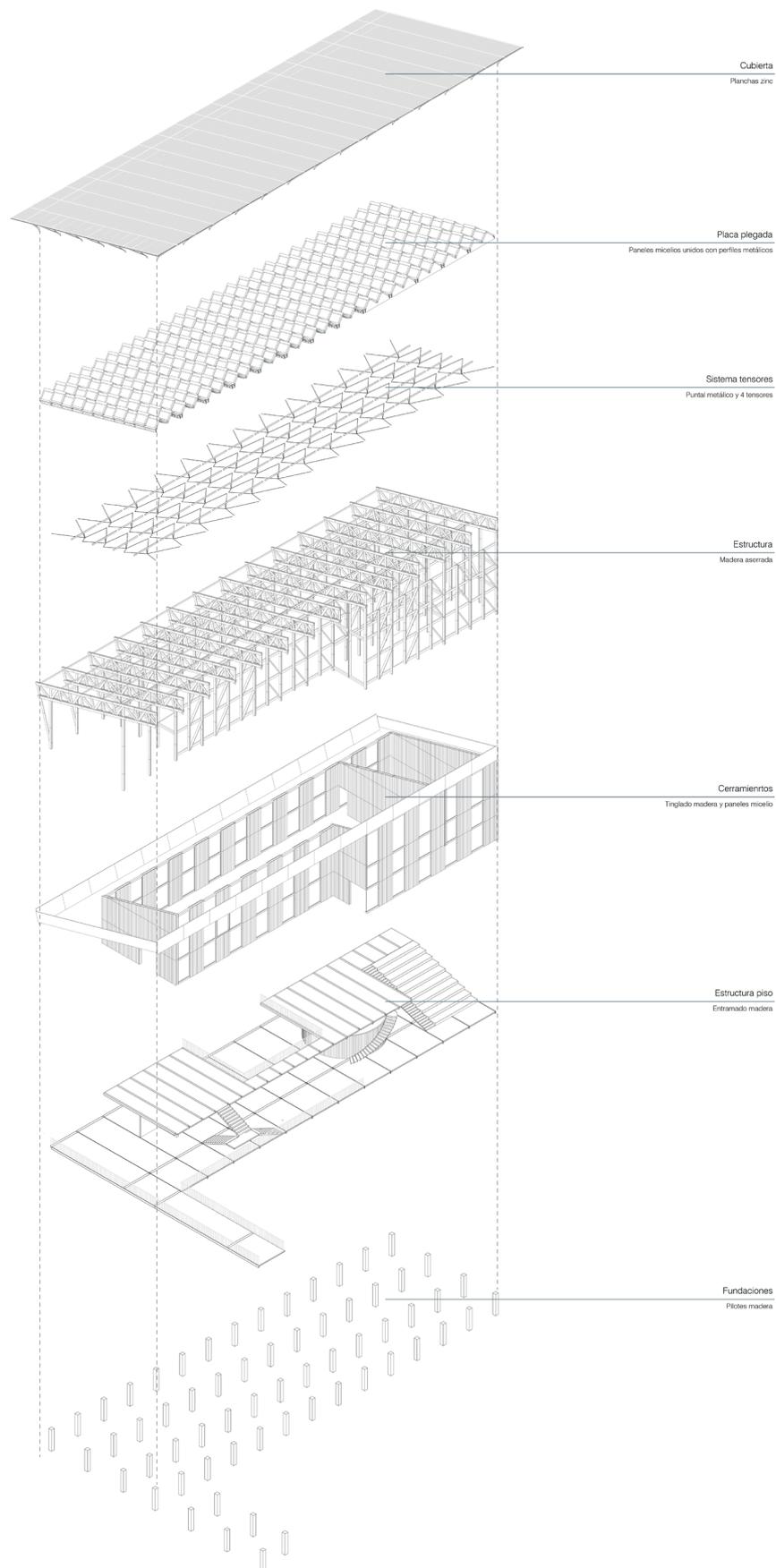
**Figura 63.** Corte Fugado Edificio Zócalo. Elaboración propia.



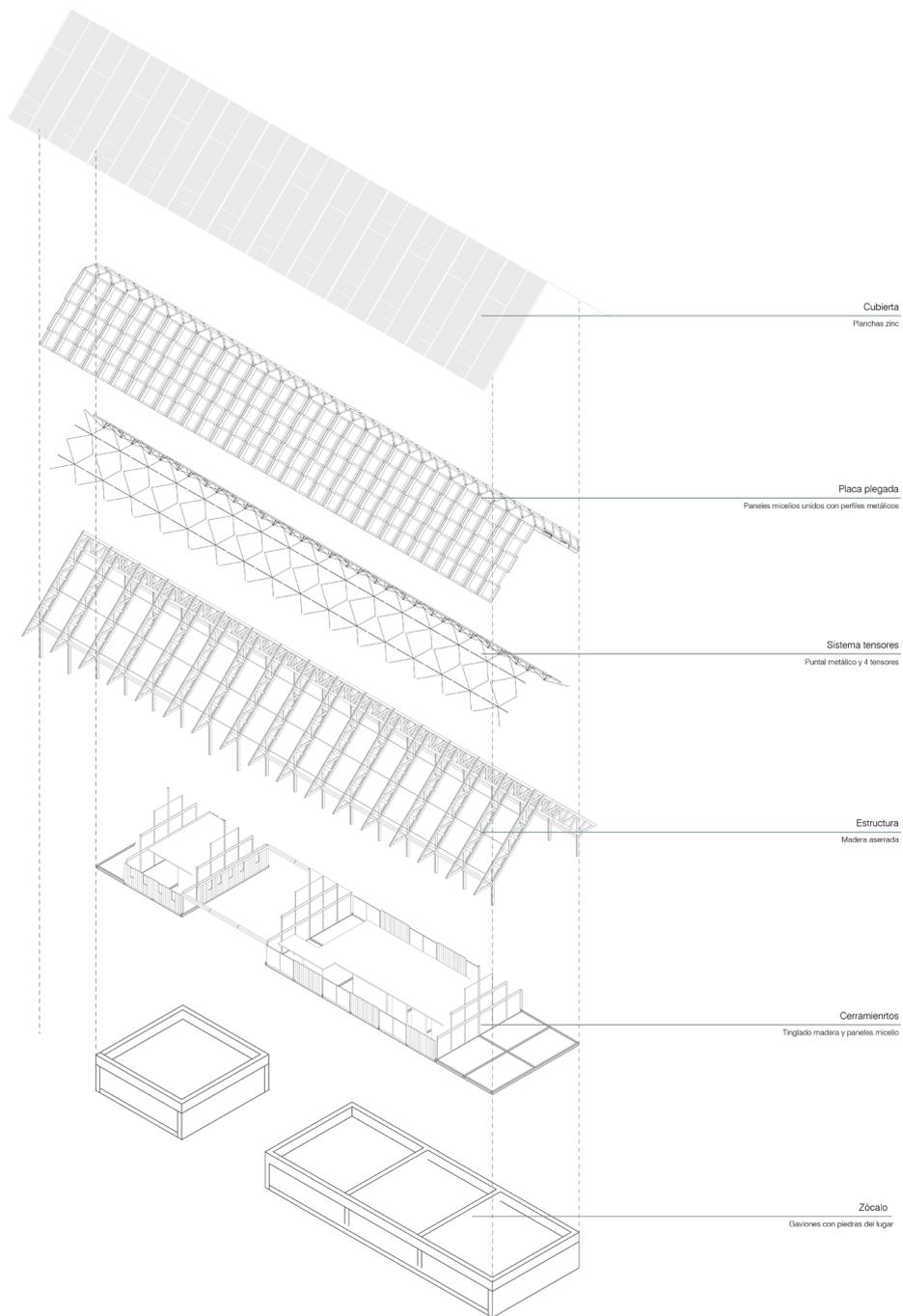


**Figura 64.** Corte Fugado Edificio Zócalo. Elaboración propia.





**Figura 65.** Axonométrica Explotada Edificio Río. Elaboración propia.



**Figura 66.** Axonométrica Explotada Edificio Zócalo. Elaboración propia.

## 08 Bibliografía

- Adamatzky, A. (2019). *Slime Mould in Arts and Architecture*. River Publishers.
- Appels, F., Karana, E., Jansen K.M.B., Camere, S., Montalti, M., Dijksterhuis, J., . . . 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. (2020). Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and. *Journal of Cleaner Production*, 246.
- Bañales-Seguel, C., Salazar, A., & Mao, L. (2020). Hydro-morphological characteristics and recent changes of a nearly pristine river system in Chilean Patagonia: The Exploradores river network. *Journal of South American Earth Sciences*, 98.
- Barroso Naranjo, D. J. (2019). *ARQUITECTURA TRANSFORMABLE. ESTRUCTURAS DESPLEGABLES*. Sevilla: MÁSTER DE INNOVACIÓN DE ARQUITECTURA: TECNOLOGÍA Y DISEÑO.
- Bracco, A. R. (n.d.). *Biological Re:Evolution The Resilient Science of Mycelium Design*. Californian Polytechnic State University San Luis Obispo, 446-451.
- Browning Hon., W., Ryan, C., & Clancy, J. (2014). 14 PATRONES DE DISEÑO BIOFÍLICO Mejorando la salud y el bienestar en el entorno construido. *Terrapin Bright Green*, 60.
- Cai, Z., Senalik, C., & Ross, R. (2021). Mechanical properties of wood-based composite materials. In *Wood handbook—wood as an engineering material*. General Technical Report.
- Campo Baeza, A. (2009). *La estructura de la estructura*. In *Pensar con las manos*. Nobuko.
- Capeluto, M., Turull Torres, M., & Galarza, F. (2014). *La materialidad del Patrimonio Moderno. Construcción, degradación y conservación*. Instituto de Investigación en Arte y Arquitectura Universidad del Salvador.
- Carranza, D., Duffo, D., & Farina, D. (2010). NADA ES PARA SIEMPRE Química de la degradación de los materiales. *Las Ciencias Naturales y la Matemática*, 180.
- Chapman, K. (2006). *Wood-based panels: particleboard, fibreboards and oriented strand board*. In *Primary Wood Processing*.
- Ching Khoo, S., Xi Peng, W., Yang, Y., Bo Ge, S., Fhong Soon, C., Ling Ma, N., & Sonne, C. (2020). Development of formaldehyde-free bio-board produced from mushroom mycelium and substrate waste. *Journal of Hazardous Materials*.
- Climent Salvador, A. (n.d.). *ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A LA ARQUITECTURA*. Universitat Politècnica de Valencia.
- Elliot, M. (2020). *Biomateriales en base a Micelio. Arquitectura en función de la biofabricación de materiales para la construcción*. Escuela Arquitectura UC.
- 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 substrate. *PLOS ONE*. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>

- 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. Konstantinos G Moustakas.
- Engel, H. (1977). *Tragysteme / Structure Systems* (4ta. Edición ed.). Deutsche Verlags-Anstalt.
- Federici Noe, F., Fuentes Palacios, A., Matute Torres, T., Muñoz Castillo, F., Nuñez Quijada, D., Nuñez Quijada, I., . . . Torres Acuña, D. (2019). *Manual de Biofabricación con hongos*.
- Fontana Cabezas, J. (2012). El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente. Universitat d'Alacant Escuela Politécnica Superior.
- Fuentes-Cantillana Monereo, I. (Junio 2020). *Bio Fabricación: Micelio como material de construcción: biocomposite en sustratos lignocelulósicos*. ETSAM/UPM.
- Ghazviniana., Farrokhsiar, P., Vieira, F., Pechia, J., & Gursoy, B. (2019). Mycelium-Based Bio-Composites For Architecture: Assessing the Effects of Cultivation Factors on Compressive Strength. *The eCAADe and SIGraDi Conference, Vol. II*.
- Grown.bio. (2020). Retrieved from Grown.bio: <https://www.grown.bio/product/insulation-panel/>
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I., Heredia-Guerrero, J., & Athanassiou, A. (2017). Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of. *Scientific Reports*, 7(1).
- Jackson, P. (2011). *Técnicas de Plegado para Diseñadores y Arquitectos*. Laurence King Publishing Ltd.
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2019). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review.
- Lube, V. M. (2016). Effects of moisture-induced thickness swelling on the microstructure of oriented strand board. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA: The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies.
- M. R. Islam, G. T. (2018). *Mechanical behavior of mycelium-based particulate*. NY, USA: Springer Science+Business Media.
- Mathias, J., Grédiac, M., & Michaud, P. (2016). *Bio-based adhesives. Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*.
- Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*. Actar and The President and Fellows of Harvard College.
- Paricio, I. (1996). *La Construcción de la Arquitectura*. Tomo 2: Los elementos. Barcelona: ITC.
- Parodi Miranda, D. (2018). Material compuesto a partir del residuo cáscara de nuez. *RChD: creación y pensamiento*, 3(5), 1-13.
- Pérez Oyarzún, F. (2007). Forma, materia, uso y lugar. In F. Pérez Oyarzún, A. Aravena, & J. Quintanilla, *Los hechos de la arquitectura*. Santiago, Chile: Ediciones ARQ.

Quesada, D. (2019, Agosto 8). El encanto de vivir en una casa de paja. Retrieved from Arquitectura y Diseño: [https://www.arquitecturaydise-no.es/pasion-eco/arquitectura-en-paja\\_220/1](https://www.arquitecturaydise-no.es/pasion-eco/arquitectura-en-paja_220/1)

Robeller, C., & Weinand, Y. (2015). Interlocking Folded Plate - Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels. *International Journal of Space Structures*, 12.

Ruta de los Parques de la Patagonia: uno de los principales sumideros de carbono de Sudamérica. (2020, Septiembre 30). Retrieved from La Ruta de los Parques: <https://www.rutadelos-parques.org/ruta-de-los-parques-de-la-patagonia-uno-de-los-principales-sumideros-de-carbono-de-sudamerica/>

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

Tudryn, D. (2014). A Formaldehyde-Free, Sustainable Alternative for the Engineered Wood Industry. RADTECH REPORT.

Valencia, N. (2014, Julio 08). Biodiseño: YAP MoMA inaugura Hy-Fi, la torre de ladrillos orgánicos y compostables. Retrieved from Plataforma Arquitectura: [https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623576/biodiseno-yap-mo-ma-inaugura-hy-fi-la-torre-de-ladrillos-organicos-y-compostables?ad\\_medium=gallery](https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623576/biodiseno-yap-mo-ma-inaugura-hy-fi-la-torre-de-ladrillos-organicos-y-compostables?ad_medium=gallery)

VIDHOLDOVÁ, Z., KORMÚTHOVÁ, D., IŽDINSKÝ, J., & LAGANA, R. (2009). COMPRESSIVE RESISTANCE OF THE MYCELIUM COMPOSITE. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW*.

Werner, C., & Robeller, M. (2015). INtegral Mechanical Attachment for TImber Folded Plate Structures. Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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