



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNA PLANTA PRODUCTORA
DE AISLANTE TÉRMICO HECHO EN BASE A MICELIOS Y RESIDUOS
LEÑOSOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

JOSÉ MANUEL OLIVARES HIRMAS

PROFESORA GUÍA:
Ziomara Gerdtzen Hakim

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
María Isabel Guerra Hevia
Fernando Nowajewski Vega

SANTIAGO DE CHILE
2023

EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE AISLANTE TÉRMICO HECHO EN BASE A MICELIOS Y RESIDUOS LEÑOSOS

La presente memoria corresponde a la evaluación técnico económica de un proyecto de producción de materiales aislantes orgánicos hechos en base a micelio y residuos leñosos, a nivel de ingeniería de perfiles. Dentro del rubro de la construcción a nivel global, la aislación térmica juega un rol fundamental por su relación con el consumo energético de las edificaciones en las que se emplea. Durante el 2019, un 53 % del consumo energético residencial en Chile se destinó a calefacción y climatización, según el estudio de consumos de energía en los hogares del Ministerio de Energía. Reducir este consumo se ha hecho especialmente relevante en el contexto del calentamiento global. A nivel país se plantea como desafío para el 2050 tener emisiones netas cero. Entre las acciones tomadas, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) ha definido estándares más exigentes en la calidad de aislación en nuevas viviendas para reducir la demanda de energía asociadas a su temperatura. Entre los aislantes convencionalmente utilizados para este propósito los más populares son sintéticos, como espumas plásticas o lanas minerales, los cuales tienen huellas de carbono significativas asociadas a su producción. Por ejemplo, el 2021 la producción de EPS emitió a nivel global 405 [Mt] de CO₂, equivalente a 4,8 lo que Chile emitió el mismo año. Los materiales de micelio compuestos (MMC) surgen en los últimos años como una alternativa atractiva a los aislantes convencionales, dada sus bajas emisiones de producción y características como su resistencia al fuego y baja conductividad térmica. Este material se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y aún hay interrogantes importantes en torno a su durabilidad y método de producción a escala industrial. La presente memoria plantea un primer acercamiento al diseño de una planta a escala industrial, en el contexto chileno, proponiendo además dos alternativas con procesos unitarios innovadores. El diseño se basa en los resultados de las pruebas experimentales realizadas. En base al diseño se determinan los costos de inversión y operación de cada alternativa, llegando finalmente a un estudio de rentabilidad. Al evaluar el VAN del proyecto con una tasa de retorno y prima de riesgo correspondiente al escenario, se determina que no es una inversión favorable. Aún así, se evalúan distintos escenarios donde se aprecia una potencial rentabilidad. Las distintas alternativas son evaluadas a través de criterio técnicos y económicos. Estos indican ventajas como la sustentabilidad del proceso y facilidad de operación, y desventajas como el alto grado de incertidumbre generado por el nivel de desarrollo de la tecnología. Se concluye que esta memoria es útil como una visión general del escenario de producción de MMC, pero por si sola no logra determinar todas las variables que surgen de implementar este nuevo proceso a escala industrial.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer primero a mis padres, quienes además de su apoyo y cariño me dieron la posibilidad de educarme y perseguir mis intereses, ellos siempre me han incentivado a ser la mejor versión de mi mismo y por eso estoy profundamente agradecido. Agradezco a mis hermanos Francisca, Felipe e Isidora además de a mi familia extensa, por compartir conmigo durante este proceso sus intereses, ideas y opiniones respecto al tema de los hongos, nutriendo el desarrollo de este trabajo y además compartiendo conmigo su perspectiva del proceso de vida que me toca atravesar, mi titulación. Me siento muy agradecido por mis amigos, BY, Pip, PB, por ser una fuente inacabable de apoyo y motivación, que no solo llega a mi a través de sus palabras, si no que también al verlos superar sus propios desafíos, feliz de compartir esta amistad con ustedes. Agradezco a mi pareja Carola, que además de compartirme su cariño y apoyo me ha enseñado a disfrutar lo que hago, lección que fue especialmente útil al escribir esta memoria. Agradezco a toda la gente que aportó a desarrollar este trabajo, a mi profesora guía Ziomara por su apoyo y siempre positiva disposición, a María Isabel por compartir conmigo sus pericia y redes de contactos, y a Fernando por su ayuda al transformar esta idea en un proyecto con fundamento. Quiero agradecer especialmente a Diego Valdez por compartir conmigo sus conocimientos de la industria champiñonera, que brindaron una nueva perspectiva, y agradecer también a Spora Biotech, equipo del cual Diego es parte, por creer en mis capacidades y hacerme parte de su proyecto de implementar materiales de micelios en distintos mercados, para transicionar a actividades humanas más sustentables.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Conocimiento base sobre hongos y el reino Fungi	3
1.2. Limitaciones proyectos MMC	6
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Materiales de micelio como aislante térmico	9
2.1.1. Materiales de aislación térmica	9
2.1.2. Materiales de micelio	11
2.1.3. Proceso de producción MMC	12
2.1.4. Caracterización mecánica y física de MMC	18
2.2. Aislantes como producto de construcción	23
2.2.1. Normativas y regulación	23
2.2.2. Estándares internacionales de medición	27
2.2.3. Fenómenos de transferencia	28
2.3. Dificultades en implementación de MMC	31
3. Metodología	34
3.1. Metodología general	34
3.2. Método experimental	34
3.2.1. Materiales	35
3.2.2. Descripción del proceso	36
3.3. Metodología de evaluación	42
3.3.1. Evaluación técnica	42
3.3.2. Metodología del Marco Lógico (MML)	43
3.3.3. Evaluación económica	48
4. Resultados y discusiones	49
4.1. Etapa experimental	49
4.1.1. Prototipos generados	49
4.1.2. Registro de producción y aspectos relevantes	51
4.1.3. Evaluación de prototipos	55
4.2. Evaluación técnica	56
4.2.1. Escala de producción	56
4.2.2. Bases de diseño	58
4.2.3. Descripción del proceso	59

4.2.4.	Procesos de producción alternativos	67
4.2.5.	Balances de masa proceso base	71
4.2.6.	Dimensionamiento	73
4.2.6.1.	Equipos principales	74
4.2.6.2.	Equipos secundarios	84
4.2.7.	Evaluación técnica de las alternativas	85
4.3.	Evaluación económica	88
4.3.1.	Modelo de negocios	88
4.3.2.	Costos de inversión	90
4.3.3.	Costos de operación	91
4.3.4.	Estudio de rentabilidad	94
4.3.5.	Análisis de sensibilidad	97
4.3.5.1.	Ajuste precio de venta	97
4.3.5.2.	Tasa interna de retorno	99
5.	Conclusiones	101
6.	Recomendaciones	104
	Bibliografía	105

Índice de Tablas

2.1.	Propiedades disntios materiales aislantes presentes en el mercado. Data de Kumar <i>et al.</i> [34].	11
2.2.	Relación entre cinéticas de crecimiento de micelio y condiciones ambientales de cultivo. <i>Nota.</i> Traducido de [37].	12
2.3.	Efecto de parámetros sobre las características de los MMC. <i>Nota.</i> Traducido de [3].	13
2.4.	Tabla comparativa de las propiedades de materiales de micelio, espumas sintéticas y productos de madera. <i>Nota.</i> Extraída de [11]. Data de [15], [23], [25] y otros.	18
2.5.	Densidad y resistencias a la tensión, compresión y flexión de MMC producidos con sustratos fibrosos y particulados. <i>Nota.</i> Traducido de [11]. Data de [15], [23], [25] y otros.	21
2.6.	Resumen de parámetros de calorimetría [53].	21
2.7.	Requisitos de resistencia térmica (Rt) de la envolvente de viviendas. <i>Nota.</i> Extraído de [55].	25
2.8.	Estándares de medición de conductividad térmica utilizados en literatura. <i>Nota.</i> Data de [3].	27
2.9.	Estándares de medición de absorción de agua utilizados en literatura. <i>Nota.</i> Data de [3].	27
2.10.	Estándares de medición de densidad y resistencia mecánica utilizados en literatura. <i>Nota.</i> Data de [3].	28
3.1.	Especies Fungi y sustratos alternativos para la producción de MMC, su uso ha sido reportado en [15].	35
3.2.	Insumos y equipos utilizados para la producción de prototipos de MMC. . . .	36
3.3.	Resumen de rangos de valores para parámetros de producción que afectan la producción de MMC.	41
3.4.	Resumen de actores involucrados en el desarrollo de los MMC como aislante para la construcción.	44
4.1.	Leyenda de nomenclatura para los prototipos producidos.	49
4.2.	Versiones de prototipos producidos	50
4.3.	Registro de masas y densidades medidas a través de la metodología experimental.	52
4.4.	Supuestos base para la evalaución del proyecto.	56
4.5.	Valores de mercado del EPS.	57
4.6.	Valores de mercado del EPS.	57
4.7.	Valores estimados, y escala de producción.	58
4.8.	Equipos y flujos del proceso base a escala industrial.	60
4.9.	Tabla resumen proceso de transporte.	61
4.10.	Tabla resumen proceso de recepción	61

4.11.	Tabla resumen proceso de trituración.	62
4.12.	Tabla resumen proceso de alimentación.	62
4.13.	Tabla resumen proceso de esterilización	63
4.14.	Tabla resumen proceso de mezclado	63
4.15.	Tabla resumen proceso de inoculación	63
4.16.	Tabla resumen proceso de prensado	64
4.17.	Tabla resumen proceso de cultivo	65
4.18.	Tabla resumen proceso de secado	65
4.19.	Flujo de masa y contenido de sección preparado.	71
4.20.	Flujo de masa y contenido de sección esterilización.	72
4.21.	Flujo de masa y contenido de sección cultivo.	73
4.22.	Lista de equipos principales de cada alternativa de procesamiento.	73
4.23.	Lista de equipos secundarios.	74
4.24.	Equipos base para laboratorio.	74
4.25.	Cotización de equipos base para laboratorio.	75
4.26.	Equipamiento necesario para la producción de inóculo sólido.	75
4.27.	Cotización equipamiento necesario para la producción de inóculo sólido.	76
4.28.	Equipamiento necesario para producción de inóculo líquido.	76
4.29.	Cotización laboratorio inóculo líquido.	76
4.30.	Costos de inversión asociados a cada tipo de laboratorio.	77
4.31.	Flujos máxicos y sus temperaturas en el túnel esterilizador.	79
4.32.	Calor requerido para la operación del túnel esterilizador.	79
4.33.	Dimensiones estantería de moldes	80
4.34.	Dimensionamiento de la sala de cultivo y precio referencial de intalación similar.	82
4.35.	Cotización equipos secundarios.	84
4.36.	Criterios de evaluación técnicos y sus puntajes relativos para cada alternativa.	85
4.37.	Criterios de evaluación técnicos y sus puntajes relativos para cada alternativa.	86
4.38.	Cálculo de grosores mínimos según requisitos de construcción chilenos.	87
4.39.	Supuestos definidos para la evaluación económica del proyecto.	88
4.40.	Resumen de las respuestas a la entrevista realizada a potenciales adaptadores tempranos de MMC en distintos rubros.	89
4.41.	Costos de inversión, caso base.	90
4.42.	Costos de inversión, alternativa 2.	91
4.43.	Dotación y consumos requeridos para la operación del caso base.	91
4.44.	Costos operacionales caso base.	92
4.45.	Dotación y consumos requeridos para la operación de la primera alternativa.	92
4.46.	Costos operacionales alternativa 1.	93
4.47.	Dotación y consumos requeridos para la operación de la segunda alternativa.	93
4.48.	Costos operacionales alternativa 2.	93
4.49.	Flujo de caja y VAN caso base en [USD].	95
4.50.	Flujo de caja y VAN alternativa 1 en [USD].	95
4.51.	Flujo de caja y VAN alternativa 2 en [USD].	96
4.52.	Flujo de caja y VAN caso base [USD], precio de venta 1,94 veces el definido inicialmente	97
4.53.	Flujo de caja y VAN alternativa 1 [USD], precio de venta 1,99 veces el definido inicialmente.	98

4.54.	Flujo de caja y VAN alternativa 2 [\$USD], precio de venta 2,24 veces el definido inicialmente.	98
4.55.	TIR caso base, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.	99
4.56.	TIR alternativa 1, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.	99
4.57.	TIR alternativa 2, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.	100

Índice de Ilustraciones

1.1.	a) Setas de <i>P. ostreatus</i> , b) ciclo de vida hongos. <i>Nota.</i> Diagrama b) traducido de [16].	3
1.2.	Estructuras moleculares de a) quitina b) quitosano y c) celulosa. <i>Nota.</i> Imagen extraída de [11].	4
1.3.	Árbol filogenético de los órdenes de Basidiomycota. A la derecha la frecuencia de uso en investigación sobre materiales de micelio. <i>Nota.</i> Imagen extraída de [15].	5
1.4.	Mecanismo de delignificación en base a enzimas. <i>Nota.</i> Traducido de [22]. . . .	6
2.1.	Kumar <i>et al.</i> , estructura propuesta para la selección de materiales aislantes óptimos para la construcción. <i>Nota.</i> Traducida de [34].	10
2.2.	Esquema del proceso de producción y fin de ciclo de vida de los MMC. <i>Nota.</i> Traducido de [15].	13
2.3.	Principales variedades de hongo usada para caracterización de MMC de acuerdo a la revisión de literatura de E. Tsao [3]. <i>Nota.</i> Traducida de [3].	14
2.4.	A) Principales tipos de muestras y B) principales sustratos usados para muestras tipo espuma de acuerdo a la revisión de E. Tsao [3]. <i>Nota</i> Traducida de [3]. . .	15
2.5.	Diagrama de flujos involucrados en la fermentación sólida del micelio.	17
2.6.	Tasa de absorción de agua de distintos MMC. <i>Nota.</i> Traducido de [23].	20
2.7.	Formación de ceniza sobre MMC al exponerse al fuego [53].	22
2.8.	Flujo de liberación de calor MMC y XPS frente a prueba de resistencia al fuego [53].	22
2.9.	Diagrama del cálculo de resistencia térmica, según método de la NCh853. <i>Nota.</i> imagen extraída de [54].	24
2.10.	Variación periódica de las condiciones de borde para determinar MBV_{ideal} . <i>Nota.</i> Extraída de [59].	31
3.1.	Diagrama de bloques del proceso de producción de prototipos de MMC.	35
3.2.	Inóculo sólido, grano de sorgo cubierto por micelio.	37
3.3.	a) Residuos de poda de viña, b) Poda de viña triturada dentro de olla a presión.	38
3.4.	Registro de nivel de cobertura de un molde durante el cultivo. Sustrato viña, sin aditivos.	40
3.5.	Carpa de cultivo en a) cultivo con molde, b) cultivo sin molde. Circulado en ambas figuras el termómetro y medidor de humedad.	41
3.6.	Diagrama de árbol de problemas de la MML.	45
3.7.	Diagrama de árbol de objetivos de la MML.	46
3.8.	Estructura analítica del proyecto	47
4.1.	Prototipos de MMC producidos.	50
4.2.	a) Vista superior y b) vista lateral de los prototipos fallidos, hechos con sustrato de cartón de huevo.	51

4.3.	Métodos de aplicación de yute como aditivo en prototipos. Vista lateral de la mezcla dentro del molde representada por el achurado, las líneas de color la forma de aplicación del yute.	53
4.4.	Configuración proceso de prensado.	53
4.5.	Aspecto de los materiales antes y después del prensado, izquierda y derecha respectivamente.	54
4.6.	Gráfico de densidades y resistencias térmicas de distintos MMC y aislantes comerciales. <i>Nota.</i> Gráfico traducido de [11]. Data de (1) Schiavoni <i>et al.</i> [39], (2) Elsacker <i>et al.</i> [25], (3) Holt <i>et al.</i> [24], (4) Papadopoulos [26], (5) Yang <i>et al.</i> [28].	55
4.7.	Diagrama de bloques proceso base.	59
4.8.	Diagrama de flujo del proceso base de producción de materiales aislantes de micelio.	60
4.9.	Formas propuestas de aplicación del aditivo arpillera de yute (líneas rojas y azules). Vista lateral del sustrato inoculado (achurado negro).	64
4.10.	Diagrama de bloques de la primera alternativa al proceso de producción.	68
4.11.	Diagrama de bloques alternativa de producción número 2.	69
4.12.	a) Pilas de sustrato en el proceso de fermentación libre, b) canales de aireación, c) Exterior de un pieza de esterilización y máquina de llenado, d) pieza de esterilización tipo túnel. <i>Nota.</i> Extraída de [86].	70
4.13.	Diagrama de flujos sección de preparado	71
4.14.	Diagrama de flujos sección de inoculación	71
4.15.	Diagrama de flujos sección de cultivo	72
4.16.	Esquema del sistema de pares regenerativos del túnel de esterilización.	78
4.17.	Vista lateral de la estantería a la izquierda y a la derecha vista superior.	80
4.18.	Vista superior de una de las salas de cultivo, con estanterías en su interior.	81
4.19.	Diseño salas de cultivo	82
4.20.	Mapa del territorio chileno dividido en zonas térmicas.	87
4.21.	Diagrama realizado mediante la metodología del doble diamante, para determinar si existen adoptadores tempranos de MMC.	89

Capítulo 1

Introducción

La construcción de viviendas en climas templados y fríos, como el de Chile, requiere de materiales aislantes instalados en cavidades al interior de muros y techumbre para mantener un mayor control del ambiente interior y con eso reducir la necesidad de energía utilizada en acondicionamiento. En zonas heladas donde se requiere de más calefacción, la aislación térmica cumple un rol estratégico en reducir la carga energética de las viviendas. Los estándares definidos por las regulaciones del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y el Instituto Nacional de Normalización (INN) están enfocadas en hacer las viviendas más confortables y además reducir el consumo energético de las mismas, llegando en casos a edificios de consumo neto cero. Los materiales aislantes empleados en construcciones tienen aún limitaciones y espacios para mejorar, la inconsistencia entre la descripción del fabricante, las condiciones de prueba de laboratorio, la instalación en terreno y el desempeño final dificultan su selección para cada aplicación [1], [2]. Los desarrollos científicos en torno a la construcción han dejado claro que la forma más eficaz de aislar edificios en contextos de alta demanda de calefacción es la aislación externa continua (*i.e.* envolvente externa sin puentes térmicos) [2]. La implementación de esta técnica está limitada a nuevas edificaciones dada la forma en la que se aplica, que requiere personal capacitado. Para la renovación de edificaciones ya construidas, la alternativa preferida es la aislación mediante la aplicación de aislantes en cavidades [3]. La mayoría del volumen de aislantes producidos es para este tipo de uso, debido a su facilidad de aplicación [4]. Por esto se plantea un proyecto de producción de materiales compuestos de origen orgánico, que reemplacen a espumas sintéticas derivadas del petróleo para su uso como aislante interno. La presente memoria busca ser una evaluación preliminar para la factibilidad del proyecto.

La actividad humana en distintos sectores ha generado emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), residuos plásticos y otros contaminantes tóxicos que son perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana. La emisión de gases de efecto invernadero está directamente relacionada al fenómeno del calentamiento global, por lo que la reducción de estas (principalmente CO₂) se ha transformado en una prioridad a nivel global, con el fin de evitar escenarios catastróficos. En 2019 las emisiones de CO₂ se distribuyeron en 34 % a raíz de la industria productiva, 22 % en agricultura y uso de suelos, 16 % en construcción, 15 % en transporte y 12 % en energía, esto al alocar las emisiones de producción energética al sector que las consume. El mismo año 12 Gt de CO₂ fueron asociadas a edificaciones, 57 % correspondiendo a consumo de energía para calefacción y electricidad, 24 % emisiones producidas en sitio y 18 % emisiones contenidas en materiales, principalmente acero y concreto

[5]. Afortunadamente, el sector de la construcción está comprometido con reducir su huella de carbono y eliminar sustancias nocivas del diseño y construcción de las edificaciones. Hoy en día la economía circular y aspectos de sustentabilidad de materiales están prosperando en decisiones de consumidor e investigación científica [6]. Estos aspectos también son promovidos por regulaciones y métodos de diseño (*e.g.* Ley 21455 Marco de Cambio Climático, Certificación CES). La economía circular se logra cuando un proceso de producción forma un ciclo al utilizar los residuos que este genera. Esta estrategia además de no generar residuos considera el fin de ciclo de vida de sus productos, reduciendo el consumo de materias primas al reciclar y reusar estos mismos.

Los materiales aislantes usados en la construcción suelen ser sintéticos o derivados del petróleo, lo que se asocia a un ciclo de vida dañino para el medio ambiente y a una lógica de producción lineal, alejada de los principios circulares. Materiales como el poliestireno expandido (EPS), poliestireno extruido (XPS) y poliuretano (PU) son derivados del petróleo. El ciclo de vida del EPS por ejemplo, genera aproximadamente 405 millones de toneladas (Mt) de CO₂ anualmente, lo que es casi cuatro veces lo que todo Chile emitió el año 2018 (*i.e.* 112 Mt de CO₂) [7], [8]. A raíz de este problema han surgido alternativas sustentables de aislación, ya sea de origen orgánico, inorgánico o sintéticos originados de residuos. Estos son definidos sustentables a partir de criterios como emisiones de CO₂ asociadas, uso de recursos, energía primaria contenida e indicadores de funcionalidad, entre otros [9]. Específicamente los materiales de origen orgánico tienen la ventaja de ser 100% biodegradables al final de su ciclo de vida. Muchos de estos se producen a partir de residuos agrícolas o forestales, los cuales se procesan para formar aglomerados, materiales compuestos, o rollos de fibras. Estos productos tienen la capacidad de regular los ambientes interiores (*i.e.* humedad relativa (HR) y temperatura) y tienen el potencial de reducir los costos operacionales de edificaciones gracias a su alta higroscopicidad (*i.e.* capacidad de retener y liberar humedad ambiental) [9], [10]. Una gran cantidad de materiales orgánicos han sido estudiados en la literatura, con procesos de producción y propiedades bastante similares. Ha surgido entre estos una alternativa llamativa, los materiales de micelio, que se producen a través del cultivo de organismos vivos. El micelio y los materiales generados a partir de él, han ganado tracción en el sector de ciencias de los materiales y en el sector de la construcción en la última década [11].

Los materiales de micelio compuestos (MMC) utilizan micelio, una red de filamentos microscópicos (hifas), para unir sustratos lignocelulósicos y producir materiales compuestos con alta porosidad. Los principales componentes del micelio son polímeros naturales como polisacáridos, proteínas y lípidos, que son 100% biodegradables. Los sustratos utilizados para la producción de MMC (usualmente residuos lignocelulósicos) no solo proveen nutrientes para el crecimiento del micelio, si no que también tienen un significativo impacto en las propiedades finales del material producido. Revisiones sobre aplicaciones del material muestran su uso comercial en distintas aplicaciones como materiales de construcción siendo materiales aislantes, paneles de absorción acústica, materiales estructurales, espumas para empaquetado, componentes en muebles u otros elementos de diseño [11], [12]. Distintos estudios han demostrado que los materiales de micelio pueden ser una alternativa sustentable para el reemplazo de espumas derivadas del petróleo usados hoy en día en el mercado de la aislación [13], [14]. Además de presentar una conductividad térmica competitiva con otros aislantes, los MMC han presentado mejor desempeño que materiales sintéticos en aspectos de resistencia y seguridad al fuego [13]. Antes de introducir el proceso de producción de los MMC, es necesario

ahondar en detalles relacionados al funcionamiento biológico de estos materiales, haciendo énfasis en el reino Fungi y en los aspectos relevantes de los organismos involucrados.

1.1. Conocimiento base sobre hongos y el reino Fungi

Existen dos principales tipos de materiales de micelio, los materiales de micelio puro (MMP) y materiales de micelio compuesto (MMC), siendo el último el foco de estudio de esta memoria. La diferencia principal es que el material resultante en los MMP no contiene sustrato lignocelulósico en su estructura, mientras que en los MMC el sustrato forma parte del producto final. En la producción de MMC el micelio empleado suele pertenecer a hongos de podredumbre blanca, dada su conocida efectividad para degradar lignina son capaces de crecer en varios tipos de materiales lignocelulósicos [15]. Este tipo de hongo producen y secretan enzimas que degradan el sustrato en nutrientes esenciales para su crecimiento. Para las pruebas experimentales en esta memoria también se ocupó un hongo de podredumbre blanco, *Plerotus ostreatus* (*P. ostreatus*). El ciclo de vida de los hongos es un bucle, presentado en la Figura 1.1, donde se liberan esporas, las cuales germinan en hifas (que cumplen la función de raíces), las cuales al crecer, cruzarse y ramificarse forman grandes redes interconectadas llamadas micelio. El micelio madura para formar cuerpos fructíferos (*i.e.* las setas) que generan esporas completando el ciclo. En la producción de materiales de micelio se busca obtener biomasa de micelio sin madurar en cuerpo fructífero. El ciclo de crecimiento y reproducción de los hongos está formado por complejos metabolismos químicos y biológicos, estudiados en el campo de la micología.

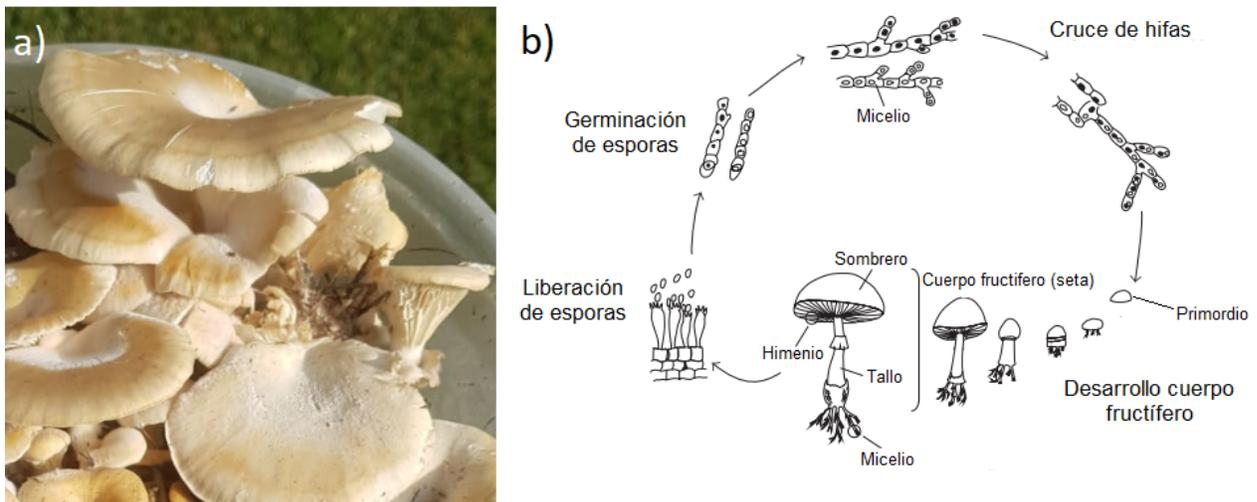


Figura 1.1: a) Setas de *P. ostreatus*, b) ciclo de vida hongos. *Nota.* Diagrama b) traducido de [16].

La pared y estructuras celulares fúngicas están compuestas de quitina, glucanos y glicoproteínas. La quitina es el segundo biopolímero más abundante en el mundo, después de la celulosa, aún cuando está solo presente en hongos y artrópodos. Este es un polímero de cadena larga, de N-acetilglucosamina, un derivado de la glucosa con un grupo amino acetilado, como muestra la Figura 1.2. Este polímero forma cadenas por enlaces covalentes β -(1,4), además los grupos acetilamina permiten la formación de puentes de hidrógeno con cadenas

cercanas, dándole al material una mayor resistencia. En la mayoría de casos las cadenas se ordenan de forma antiparalela, formando una estructura cristalina llamada α -quitina, la cual le da estructura a las hifas y micelios de hongo. Su biosíntesis es variada y está regulada por una serie de genes y enzimas [17]. Los hongos ocupan variadas fuentes de nitrógeno, como nitratos, amonio, o glutamina, para generar el grupo amino que luego reemplaza el hidroxilo en la celulosa. Este último proceso diferencia a la quitina y quitosano de la celulosa, como se aprecia en la Figura 1.2.

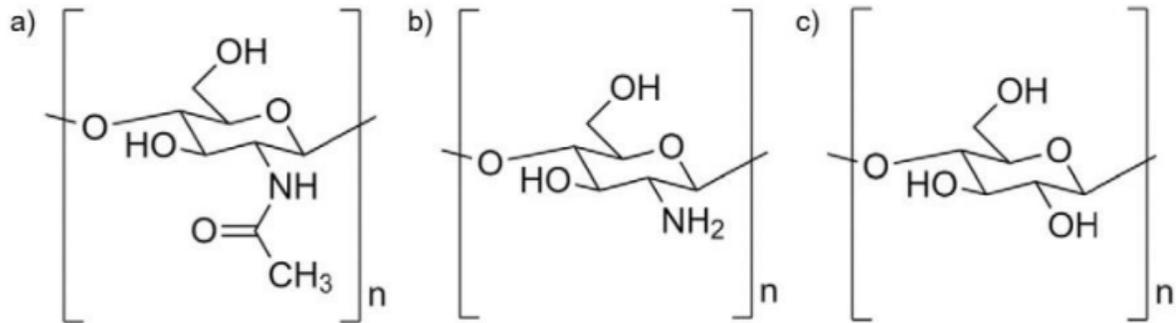


Figura 1.2: Estructuras moleculares de a) quitina b) quitosano y c) celulosa.
 Nota. Imagen extraída de [11].

P. ostreatus corresponde taxonómicamente a la división Basidiomycota del reino Fungi, orden *Agaricales*, y familia *Pleurotaceae*. La clasificación taxonómica sortea especies en grupos jerárquicos, separándolos según rasgos característicos. Este ordenamiento se representa en árboles filogenéticos, que son usados para clasificar especies en el el reino Animalia y Plantae también. Elsacker *et al.* [15] compiló información sobre las especies de hongos empleadas en estudios sobre materiales de micelio, en un árbol filogenético presentado en la Figura 1.3. El orden *Agaricales* es el más popular entre las especies utilizadas, como se señala en la imagen, y *P. ostreatus* pertenece a esta. Otras especies populares utilizadas como *Ganoderma lucidum* y *Trametes versicolor* (*T. versicolor*), pertenecen a el orden *Polyporales*, otro de los más utilizados en las pruebas con materiales de micelio.

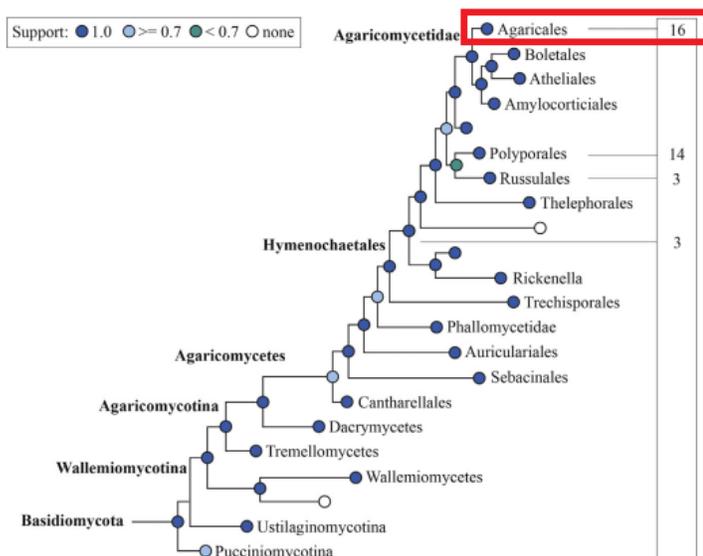


Figura 1.3: Árbol filogenético de los órdenes de Basidiomycota. A la derecha la frecuencia de uso en investigación sobre materiales de micelio. *Nota.* Imagen extraída de [15].

Además de las clasificaciones taxonómicas los hongos se pueden dividir en cuatro grupos, dependiendo de su forma de obtención de alimento. Estos grupos son hongos saprofitos, parasíticos, micorrizas y endófitos. Los últimos se alimentan de plantas sin causarles daño o beneficio, desde su interior. Los micorrizas forman una simbiosis con raíces, ayudándolas a absorber nutrientes, y a la vez absorbiendo nutrientes de las raíces. Los parasíticos se alimentan de plantas, animales o insectos, causándole daño a el huésped, y por último los saprofitos son descomponedores, primarios y secundarios, que degradan materia orgánica muerta de diversos orígenes. Los hongos blancos son parte de este grupo, y son de entre estos los que tienen mejores capacidades para degradar lignina [18].

Se ha estudiado una variedad de sustratos lignocelulósicos para la fabricación de MMC usando micelio de *P. ostreatus*. Un estudio [19] evaluó el crecimiento de 126 placas de MMC, usando micelio de *P. ostreatus* y *G. lucidum*, sobre 14 tipos de sustratos. Entre estos aparece la poda de vid y el cartón de huevo, dos de los sustratos usados en la presente memoria. Se describen como favorable y muy favorable respectivamente, según su nivel de colonización y la aglutinación de las partículas del sustrato [19]. El efecto de la composición del medio en el crecimiento del micelio de *P. ostreatus* fue revisado en [20], en el contexto de la producción de hongos para alimento. La tasa de crecimiento apical máxima ($0,50 \pm 0,02 \text{ cm day}^{-1}$) se alcanza con sustratos en relación carbono nitrógeno (C/N) entre 22,4 y 23,2 [20]. Aún así la optimización del sustrato utilizado para la producción de MMC no está definida, y su determinación requiere investigación adicional que se escapa del alcance de la memoria.

El proceso bio-químico por el cual el micelio degrada material lignocelulósico es conocido como delignificación. Aspectos específicos de este mecanismo aún tienen que ser determinados y la información existente le falta detalle [21]. Puntualmente los hongos de podredumbre blanca han sido estudiados más en profundidad, se sabe que estos producen variadas enzimas degradadoras de polisacáridos y de delignificación para descomponer madera y plantas.

Algunas de estas son lacasas, lignina peroxidasa (Lip) y manganeso peroxidasa (MnP) [22]. Un mecanismo de delignificación propuesto se muestra en la Figura 1.4, en donde a través de la acción de estas enzimas el micelio es capaz de obtener nutrientes (*i.e.* azúcares, carbono, nitrógeno, etc.) a través de sus hifas, y de degradar la lignina presente. En la naturaleza estos mecanismos suceden en la superficie de la madera, donde los hongos de podredumbre logran insertarse, ocupando el lumen celular, menoscabando la estructura del material y colonizándola con micelio [21].

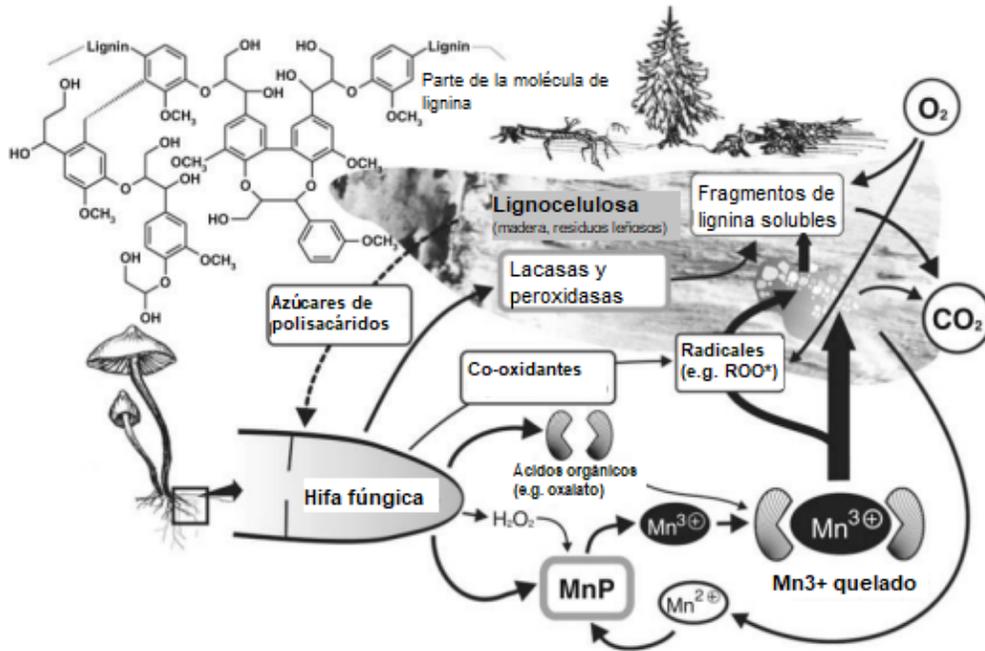


Figura 1.4: Mecanismo de delignificación en base a enzimas. *Nota.* Traducido de [22].

1.2. Limitaciones proyectos MMC

Uno de los aspectos importantes a considerar en el diseño de aislación interna es la condensación que inevitablemente se genera en el interfaz de los materiales aislantes de la envolvente térmica. Esto ocurre cuando se presentan condiciones no isotérmicas (*i.e.* temperatura interna mayor que la exterior; HR interna menor que la exterior). La condensación se acumula y es absorbida por los materiales aislantes. La conductividad térmica del material aumenta debido a la alta conductividad del agua, lo que perjudica la eficacia de la capa aislante para la minimización del traspaso de energía. Es por esto que la conductividad térmica, la permeabilidad al vapor y la absorción de agua son coeficientes importantes a considerar al escoger materiales aislantes [3].

Al igual que otros materiales compuestos de origen orgánico, los MMC tienen una debilidad intrínseca al ser usados como aislantes para la construcción, debido a que gran parte del material es partículas fibrosas. Tanto la micro-estructura de los componentes del sustrato y su hidrofiliicidad generan una alta tasa de permeabilidad y absorción de agua en el material. Luego de la exposición prolongada al agua las propiedades térmicas y mecánicas se ven disminuidas de forma significativa, lo que supone problemas de rendimiento y durabilidad [23],

[24], [25]. Aún así, existen pocos estudios y experiencias reportadas sobre los problemas de durabilidad del material. N. Attias *et al.* proponen un método de diseño del material utilizando herramientas biotecnológicas [27]. En su estudio, revisan la relación entre las propiedades de densidad y absorción de agua, con las tres variables sustrato, especie de hongo y método de cultivo. Una variedad de parámetros pueden ser abordados para el mejoramiento de las propiedades del material, por ejemplo la especie fúngica, el sustrato y sus parámetros, procesos de incubación, métodos de fabricación, post procesamiento y modificaciones genéticas o bioquímicas [27].

Los MMC son materiales relativamente nuevos, tanto en el mercado como en investigación. En varias publicaciones de recopilación y revisión de estudios sobre el material se señala que la variabilidad en métodos y propiedades reportadas hace difícil la comparación y destilación de los resultados obtenidos [11], [14], [28]. En el marco teórico de la presente memoria se expone una revisión de los MMC basada en el trabajo hecho por Y. Tsao [3]. Este divide la revisión en tres secciones. Primero una revisión de las características importantes de los materiales aislantes presentes en el mercado (*i.e.* lanas minerales, XPS y EPS), junto con la presentación de MMC y sus propiedades reportadas en distintas publicaciones. Segundo, un estudio de los requerimientos técnicos, adaptados en este caso para el contexto chileno, de los materiales aislantes en la construcción. Tercero, una revisión de los desafíos y oportunidades que los MMC presentan a la hora de integrarse al mercado [3].

Los MMC tienen una difícil barrera técnica que superar antes de incorporarse en el mercado de la construcción y en otros. Esto impide su implementación y por lo tanto reduce el impacto positivo que estos podrían tener. El desarrollo de proyectos de emprendimiento que implementen MMC son esenciales para superar esta situación. Los casos de éxito en el campo de los materiales de micelio han sido gracias a la investigación y desarrollo sobre el diseño de productos, lo que está relacionado con la obtención de financiamiento en las etapas iniciales de los proyectos. El objetivo de la memoria está relacionado a este aspecto, en darle respaldo a futuras ideas de emprendimiento para que logren avanzar en su desarrollo. Esto a través de una evaluación preliminar de la factibilidad técnica y económica de un proyecto de producción de MMC a gran escala. Actualmente no hay reportes de los costos de producción de los MMC, aun que Jones *et al.* hacen una estimación económica positiva de estos, al cuantificar los costos de las materias primas entre 0,07 y 0,17 [\$USD] por [kg] de MMC producido [11]. Se espera que los resultados de esta memoria sirvan para esclarecer los desafíos técnicos y económicos que los proyectos en esta área pueden encontrar.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica económica de la instalación de una planta productora de material aislante hecho a partir de residuos leñosos y micelios.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Producir materiales de micelio de forma experimental utilizando procesos definidos en base a resultados previos y a referencias bibliográficas.
- Evaluar de forma experimental el efecto de variaciones en el proceso, en específico el sustrato utilizado, el uso de aditivos y la variación de métodos de secado.
- Diseñar un proceso de producción a escala industrial y dos alternativas, definiendo balances de masas y dimensiones de equipos.
- Evaluar la factibilidad económica de cada alternativa de producción a través de estudios de costos y rentabilidad.
- Analizar distintos escenarios de producción y mercado a través de un análisis de sensibilidad.

Capítulo 2

Marco Teórico

El marco teórico se realizó mediante la revisión de información publicada en literatura científica. La selección del material de estudio fue a partir de búsquedas de palabras clave como *mycelium materials* e *insulation materials*, eligiendo títulos y resúmenes de interés. Se seleccionaron además fuentes citadas en las publicaciones revisadas. Esta sección se basa en el marco teórico de la tesis de magister de Y. Tsao, quien también aborda los MMC como aislante para la construcción [3]. La primera sección del marco teórico (sección 2.1) presenta primero una revisión de los materiales aislantes en el mercado actual, su empleo como productos de construcción y sus propiedades mecánicas y de aislación. Luego se presentan los materiales de micelio, como una alternativa innovadora para la aislación, presentando características relevantes de los materiales de micelio compuestos (MMC) como material aislante. Se revisa su proceso de producción, las variables que afectan sus características y las propiedades materiales reportadas en las distintas publicaciones. En la siguiente sección (sección 2.2) se estudian los requerimientos técnicos de los materiales aislantes en la construcción, en específico los requerimientos definidos para la construcción en Chile. Por último (sección 2.3) se resumen los principales desafíos presentes en la implementación de los materiales de micelio identificados por la literatura.

2.1. Materiales de micelio como aislante térmico

2.1.1. Materiales de aislación térmica

Se han desarrollado varios estudios comparativos, herramientas de análisis y comparaciones con múltiples criterios sobre los materiales de aislación actualmente presentes en el mercado. Estos estudios incluyen aislantes que se encuentren en el mercado actual, clasificándolos en materiales convencionales (como EPS, XPS y lanas minerales), materiales poco convencionales (alternativas orgánicas e inorgánicas sustentables), y materiales innovadores (como paneles al vacío o Aerogel) [1] [34] [39]. A pesar de que estas publicaciones no abordan directamente a los materiales de micelio, su composición en base a materia leñosa y micelio los clasifica como aislantes bio-basados, una de las categorías de materiales poco convencionales comparadas en la literatura.

Para comparar aislantes bio-basados, espumas inorgánicas, y espumas sintéticas se ocuparon una serie de parámetros, indicadores y criterios interrelacionados [34]. La Figura 2.1 resume estos criterios y sus relaciones. De entre los parámetros incluidos en esta gráfica, se

presentan datos de los más relevantes en la Tabla 2.1, comparando los materiales aislantes enlistados en la misma.

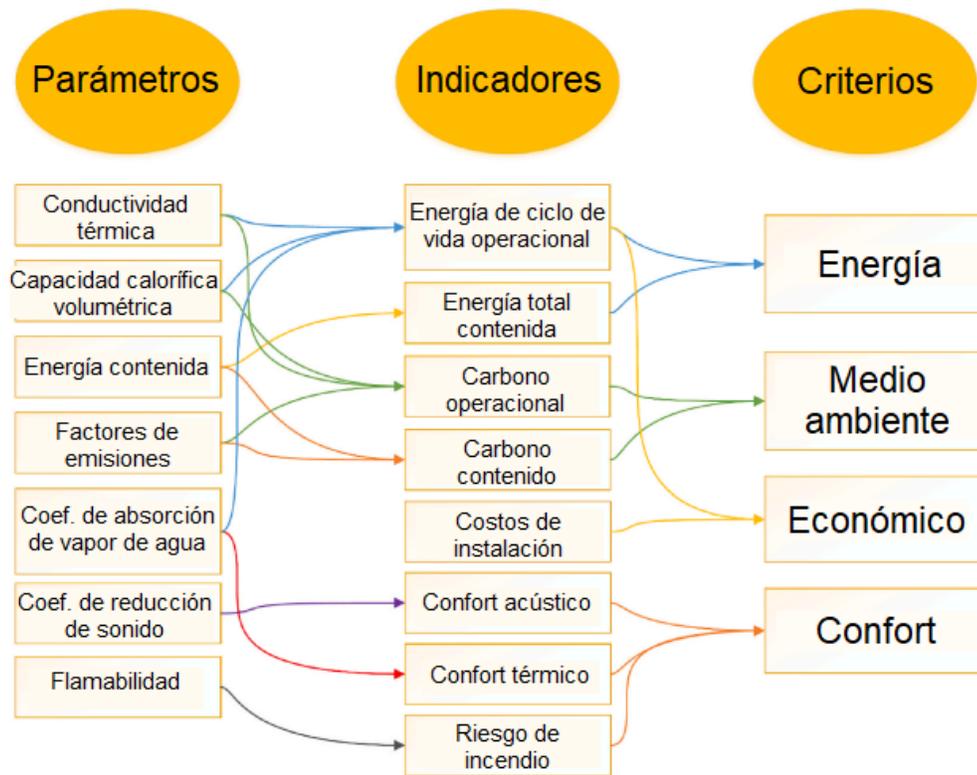


Figura 2.1: Kumar *et al.*, estructura propuesta para la selección de materiales aislantes óptimos para la construcción. *Nota.* Traducida de [34].

El análisis de mercado realizado por Ceresana el 2019 muestra que el mercado de los aislantes está dominado por aislantes inorgánicos, con 35 % del volumen total del mercado correspondiente a la lana de vidrio y 20 % a lanas minerales. Su desempeño en factores como costos, propiedades de aislación, robustez a condiciones externas, facilidad de transporte y resistencia al fuego lo han situado como las alternativas preferidas. Espumas sintéticas como el EPS y XPS corresponden a 34 % del volumen de mercado, con características similares pero peor resistencia al fuego. Estas alternativas tienen una alta durabilidad, pero al no descartarlas apropiadamente se transforman en contaminantes al final de su ciclo de vida además de tener altos niveles de energía contenida y altas emisiones asociadas a su producción [35].

Como muestra la Tabla 2.1, los materiales bio-basados (*e.g.* cáñamo, cáscaras de arroz y fibra de madera) han presentado propiedades térmicas competitivas y costos potencialmente menores comparados con las espumas sintéticas y las lanas minerales, dependiendo aún de las especies utilizadas y los métodos de producción [34], [39]. Desde un punto de vista ambiental, los materiales bio-basados tienen significativamente menor energía contenida y emisiones de carbono asociadas. En construcción tienen un menor factor de resistencia a la difusión de vapor (μ) debido a la alta porosidad y a celdas de aire abiertas, que además de generar variabilidad en su capacidad aislante inciden en problemas de durabilidad [3].

Tabla 2.1: Propiedades disntios materiales aislantes presentes en el mercado.
Data de Kumar *et al.* [34].

Material	Densidad	Conductividad térmica	Capacidad de calor específico	Factor de resistencia a la difusión del vapor	Costo	Energía contenida	Carbón contenido
Unidad	[kg/m ³]	[W/(m K)]	[J/g C]	[-]	[USD/m ³]	[MJ/kg]	[kg CO ₂ -eq/kg]
Aislantes bio-basados							
Cáñamo	25-100	0,039-0,123	1,7-1,8	1-10	15-19,4	18,71	0,14
Lino	20-100	0,033-0,09	1,6	1-5,28	15,18	39,5	20
Cáscara de arroz	130-170	0,048-0,08	1,2-2,7	2	5	1,36	0,6
Fibra de madera	50-270	0,038-0,05	1,9-2,1	1-5	26,6-37,8	20,3	0,124
Aislantes inorgánicos							
Lana de vidrio	10-100	0,03-0,05	0,8-1	1-1,3	9,3-14,7	14-30,8	1,24
Lana mineral	40-200	0,033-0,04	0,8-1	1-1,3	12-20	16,8	1,05
Espumas sintéticas							
EPS	18-50	0,029-0,041	1,25	20-100	8,6-17	80,8-127	6,3-7,3
XPS	32-40	0,032-0,037	1,45-1,7	80-170	18-23	72,8-105	7,55
Poliuretano	30-160	0,022-0,035	1,3-1,45	50-100	24,91	74-140,4	5,9
Espuma fenólica	40-160	0,018-0,024	1,3-1,4	35	23	13-159	4,15-7,21

Dado que la aislación térmica tiene un papel principal en reducir la energía operacional de edificios en el largo plazo, se requieren acercamientos más rigurosos y holísticos en la selección de materiales y en el diseño [34]. En predicciones al 2050, se estima que la pronta implementación de estándares más exigentes en aislación térmica de nuevos edificios y la renovación de antiguos, puede ahorrar entre un 43 % y un 64 % del consumo de energía en acondicionamiento térmico en China y África (donde se espera una tasa de construcción elevada), y entre un 20 % y 32 % en Europa. Países con alta demanda de acondicionamiento, como Chile, tienen un potencial ahorro de hasta un 79 % en esta energía en el caso de implementar nueva regulación y renovar edificios antiguos prontamente, una implementación retrasada hasta el 2030 de estos estándares reduce ese potencial hasta un 44 % [36].

2.1.2. Materiales de micelio

El proceso de producción de los MMC es bastante similar al de la industria de producción de hongos comestibles. Los tres componentes principales del material son el sustrato (el medio que provee los nutrientes para el desarrollo de los hongos y principal parte estructural de los MMC), el micelio de hongo (su crecimiento a través del sustrato genera una malla tridimensional que actúa como aglomerante), y el agua. Su producción es bastante simple, existe un procedimiento básico que es de libre acceso, empleado por ejemplo en el método experimental de esta memoria. Distintos investigadores y empresas han variado este proceso, logrando mejorar, a veces, las propiedades del material para su uso en distintas aplicaciones.

La proliferación del micelio para adherir el sustrato y las características de la cara externa de los MMC son altamente dependiente de las especies utilizadas y de las condiciones de culti-

vo. Ha sido del interés de la micología y las industrias productivas determinar las condiciones óptimas de crecimiento. Para varias especies se conocen las condiciones y tiempos de cosecha óptimos. La cinética de crecimiento del micelio de hongos sigue el mismo comportamiento que la de cultivos de microorganismos, dividiéndose en tres fases, la fase lag, exponencial y estacionaria.

Una condición de cultivo óptima es aquella que minimiza la fase lag y asegura llegar a la fase exponencial lo antes posible, lo que resulta en velocidad de crecimiento y en biomasa final máxima [37]. La investigación por Jones *et al.* muestra una compilación de relaciones entre condiciones ambientales de cultivo y aspectos de la cinética de crecimiento, que se muestra en la Tabla 2.2. En general, mayores volúmenes de inóculo, temperaturas de cultivo y difusión de agua resultan en mejores velocidades de crecimiento y mayor rendimiento en producción de biomasa.

Tabla 2.2: Relación entre cinéticas de crecimiento de micelio y condiciones ambientales de cultivo. *Nota.* Traducido de [37].

Parámetros ambientales	Fase Lag	Fase exponencial
Densidad de inóculo ↑	↓	↑ Tasa de crecimiento; ↑ Rendimiento de biomasa
Temperatura ↑	↓	↑ Tasa de crecimiento
Actividad de agua ↑	↓	↑ Tasa de crecimiento
pH extremo	↑	↓ Tasa de crecimiento

Los MMC han empezado a recibir atención en los últimos años, con un 70% de las investigaciones en torno a este publicadas entre 2018 y 2020 [3]. Aún así, la literatura al respecto es escasa y la mayoría se centra en la caracterización de las propiedades del material, lo que refleja el estado de desarrollo temprano en el que se encuentra. Algunas publicaciones se centran en aspectos de diseño y formas de moldeado, dándole énfasis a la estética del material [12], [38]. Otros estudios se han enfocado en el proceso productivo, buscando condiciones óptimas de crecimiento y maximizar rendimientos, incluso considerando el escalamiento para producción [27], [39], [41]. Ciertas investigaciones relacionan la expresión y delección de genes con las propiedades del material [42], [43]. Varias publicaciones también presentan revisiones generales del estado del arte del material, buscando tener una visión generalizada de las posibles aplicaciones y futuros desarrollos en torno a los MMC [11], [15], [30], [37], [45].

2.1.3. Proceso de producción MMC

Elsacker *et al.* [15] señalan como la contaminación ambiental y la escasez de recursos ha generado un aumento en el interés por materiales más sustentables. Prácticas como la que existen hoy en el mercado de la construcción, que se basa en la extracción de combustibles fósiles y materias primas, se encuentran bajo escrutinio. Se propone en la publicación una solución a través de materiales de micelio, producidos a partir de fibras naturales ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina combinados con micelios de hongos saprófitos capaces de degradarlas y formar el material. Estas fibras pueden ser obtenidas de flujos residuales de industrias como la agrícola o la forestal, las cuales son valorizadas a través del proceso de producción de MMC, resultando en materiales que al final de su ciclo de vida son biodegra-

dables. Estos aspectos hacen el proceso uno afín a los principios de la economía circular. El proceso de producción y su circularidad se reflejan en la Figura 2.2.

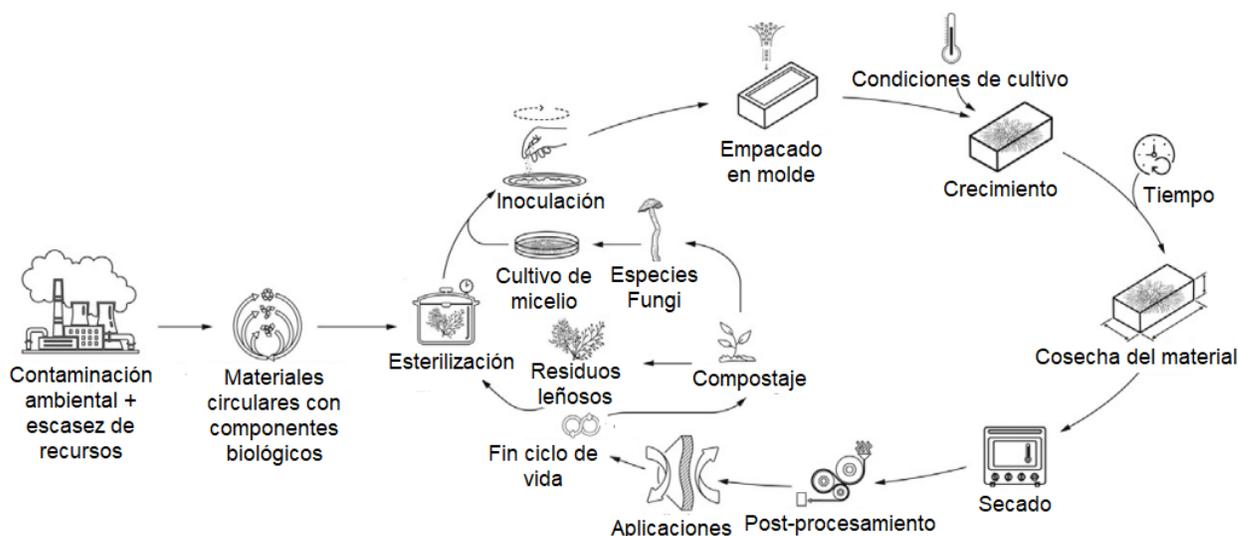


Figura 2.2: Esquema del proceso de producción y fin de ciclo de vida de los MMC. *Nota.* Traducido de [15].

Distintas publicaciones han estudiado cómo las variables de producción de los MMC afectan sus características materiales. Se ha visto que la elección de sustrato, tanto por su composición química como por los tamaños de fibras y partículas, afectan fuertemente las características mecánicas y físicas del material [14], [15], [23], [37]. Por ejemplo, sustratos de fibras delgadas y partículas pequeñas generan MMC con más altas densidades que los producidos con sustratos de mayor tamaño, que además resultan de mayor porosidad. La velocidad de crecimiento del micelio aumenta al haber más nutrientes disponibles en el sustrato, lo que hace necesario menores tiempos de cultivo. También condiciones de cultivo como hidratación del sustrato, cantidad de luz, flujo de aire, temperatura y humedad influyen en la velocidad de crecimiento y en la cantidad de biomasa final de micelio [15], [24], [25], [37].

Procesos de post procesamiento como el prensado en caliente suelen resultar en mayores resistencias mecánicas debido a la reducción de las burbujas de aire en el material [23], [44]. Se resume en la Tabla 2.3 las variables de procesamiento y su impacto sobre las características del material, que serán explicadas en profundidad a continuación.

Tabla 2.3: Efecto de parámetros sobre las características de los MMC. *Nota.* Traducido de [3].

Parámetros	Impacto en características de los MMC
Variación de hongo	Morfología de superficie, velocidad de crecimiento, integridad estructural, degradación de lignina, densidad de micelio.
Sustrato	Densidad MMC, porosidad, propiedades mecánicas y físicas.
Proporción sustrato inóculo	Velocidad de crecimiento, densidad micelio, integridad estructural.
Condiciones de cultivo	Densidad MMC, porosidad, absorción de agua, propiedades mecánicas y físicas
Post-procesamiento	Propiedades mecánicas y físicas, absorción de agua

Variedades de hongo y sustrato

La variedad de hongo afecta la densidad del micelio en MMC, el tipo de ramificación y la morfología superficial del material. La primera hace referencia a la densidad de la biomasa de micelio formada en el MMC. Esta característica influencia las propiedades físicas y mecánicas del material al ser el micelio el aglutinante y parte estructural de este. El tipo de ramificación hace referencia a la forma en que las hifas se extienden y se dividen al colonizar el sustrato. A nivel celular la ramificación puede ser apical o lateral, esto varía en función de la genética y condiciones ambientales, y afecta a la degradación del sustrato y la estructura del micelio. La morfología de superficie es la propiedad que determina la cara exterior del material. Algunos hongos forman una felpa de micelio en la superficie, la cual ha mostrado propiedades de impermeabilidad al agua [14], [15].

La Figura 2.3 muestra la frecuencia de uso de las variedades de hongos en publicaciones sobre MMC. En la revisión hecha por E. Tsao, un 28 % de los estudios no especifica la variedad usada, y de entre las restantes no hay una preferencia clara [3]. Los tres Fungi más comúnmente usados, *P. ostreatus*, *T. versicolor* y *G. lucidum*, pertenecen a la división Basidiomycota, del orden Agaricomycetes. Los tres además son hongos de podredumbre blanca, saprófitos.

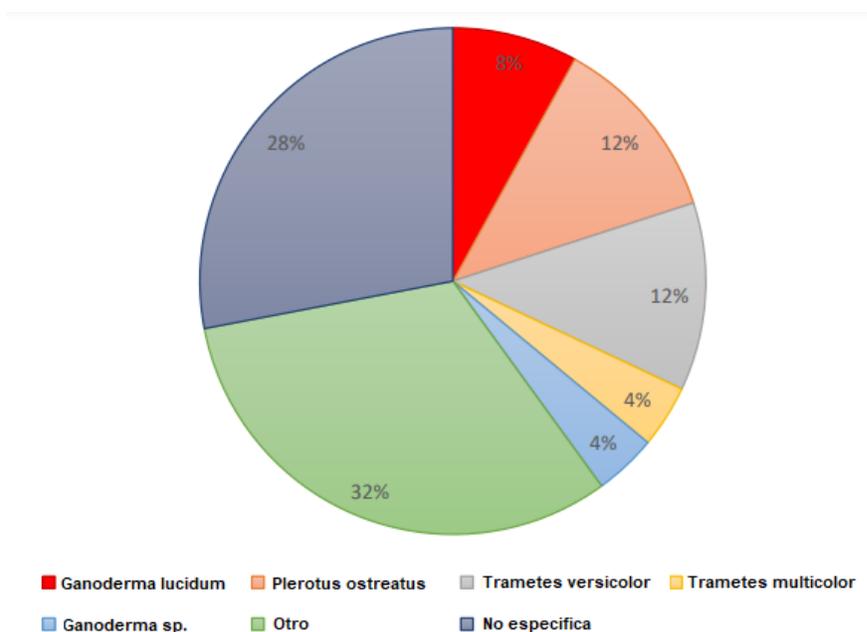


Figura 2.3: Principales variedades de hongo usada para caracterización de MMC de acuerdo a la revisión de literatura de E. Tsao [3]. *Nota.* Traducida de [3].

La variedad de hongo elegida afecta directamente el tipo de sistema de hifas que forma al micelio. Existen tres tipos de hifa, generativa, esqueléticas y envolventes. El sistema de hifas de cada especie puede ser monomítico (solo hifa generativa), dimítico (hifas generativas y esqueléticas o envolventes), o trimítico (hifas generativas, esqueléticas y envolventes) [40]. Distintos estudios indican que especies con sistemas trimíticos producen MMC con mayores

resistencias a la compresión que especies que presentan otros sistemas [15], [37]. *P. ostreatus*, la especie elegida para la producción de MMC en esta memoria, y varias otras especies pertenecientes al orden *Agaricales* presentan sistemas trimíticos. Mientras que otras sepas comúnmente usadas para la producción de MMC, como *T. versicolor* y *G. lucidum*, tienen sistemas dimíticos.

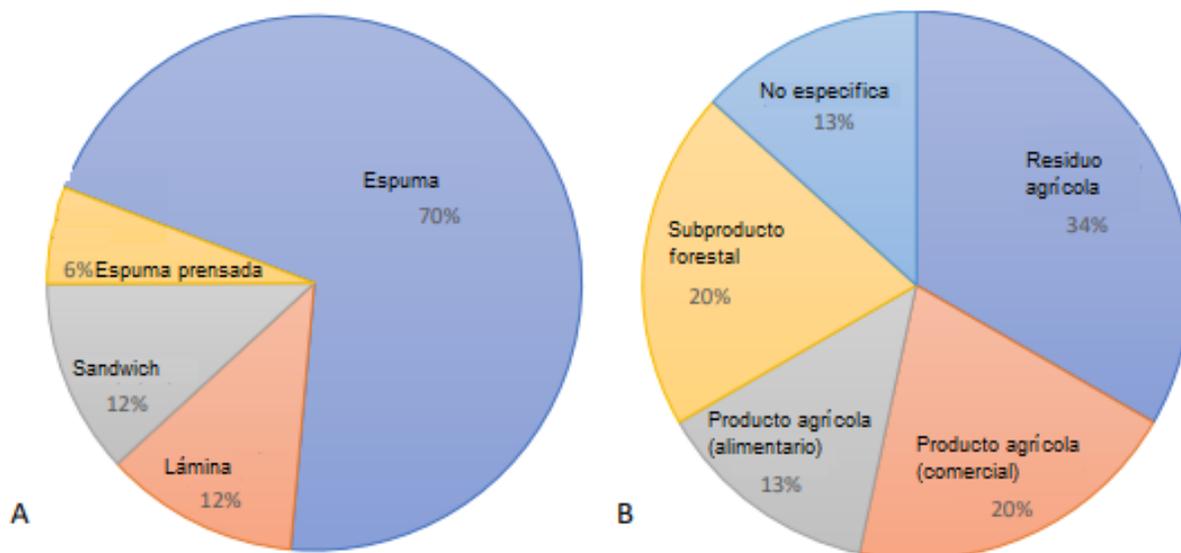


Figura 2.4: A) Principales tipos de muestras y B) principales sustratos usados para muestras tipo espuma de acuerdo a la revisión de E. Tsao [3]. *Nota* Traducida de [3].

En la Figura 2.4 A se ven los tipos de materiales de MMC producidos en las publicaciones revisadas por E. Tsao. Un 70% de las muestras corresponden a MMC tipo espuma, que corresponden a materiales porosos de baja densidad, y baja resistencia a la compresión, como los producidos en esta memoria. Su preferencia se debe a que el método de fabricación solo requiere secado en horno o al aire libre después del cultivo [3]. Las otras alternativas requieren métodos de post-procesamiento adicionales. Por ejemplo la producción de espumas prensadas requiere de prensado en caliente o en frío después del secado, esto mejora las propiedades mecánicas del MMC [23], [44], pero elimina burbujas de aire de su interior, aumentando su conductividad [25].

La elección de tipo de sustrato para la producción de MMC tipo espuma, presentado en la Figura 2.4 B muestra una leve preferencia por los residuos agrícolas con un uso de 34%. Se muestra a continuación una síntesis de las razones de elección de sustrato, ideada por E. Tsao [3]:

- Aplicación del MMC:

La elección de sustrato tiene una incidencia clara sobre las propiedades mecánicas y porosidad del material producido, por lo tanto la elección está condicionada por el uso final que se le quiera dar al MMC. Por ejemplo, su uso en aplicaciones que no requieran soportar cargas, como aislamiento térmico, acústico o materiales de empaquetado, se producen preferentemente con sustratos fibrosos, con partículas grandes, para aumentar la

porosidad y disminuir la densidad final del material. Residuos agrícolas como la poda de viña y los tallos de haba entran en esta categoría. Si el propósito es producir MMC con mayor resistencia mecánica, para aplicaciones en muebles o como planchas o ladrillos estructurales, es preferible partículas de menor tamaño y el uso de subproductos forestales por el alto contenido de lignina en las células de la madera.

- Consideraciones económicas y ambientales:

La preferencia por usar residuos agrícolas como sustrato, mostrada en la Figura 2.4, está alineada con el interés de hacer el proceso de forma sustentable, en línea con los principios de economía circular. La capacidad de los hongos saprófitos de degradar materia lignocelulósica abre la posibilidad de valorizar los residuos y subproductos de otras industrias para producir nuevos materiales y productos. Los residuos agrícolas (*i.e.* poda, cáscaras) al no poder ser usados como alimento para ganado son descartados mediante el compostaje o la quema en los predios agrícolas en los que fueron producidos [45], lo que tiene una huella de carbono asociada [46]. Desde el punto de vista económico y ambiental, elegir residuos forestales y agrícolas para la producción de MMC, por sobre productos, reduce los costos de producción, los residuos generados y las emisiones asociadas al proceso (considerando que se evita su quema).

- Crecimiento del hongo y mezcla sustrato inóculo:

Distintos estudios han descrito los mecanismos de degradación de lignocelulosa de hongos saprófitos, y se ha visto como varían entre especies. Algunas especies prefieren fuentes de nutrientes más ricas en celulosa que en hemicelulosa y viceversa [21] [22]. Una vez definida la variedad de hongo elegida para producir MMC, es necesario hacer un estudio de cinéticas de crecimiento o de composición química para determinar un sustrato óptimo para la producción. No hay literatura en torno a este tema por lo que se requiere estudios adicionales en este campo [3].

Mezcla inóculo sustrato

La mayoría de los estudios incluidos en esta revisión no proveen proporciones de mezcla en la producción de MMC. Se reporta que más de la mitad de las publicaciones actuales en torno a los MMC están sujetas a secretos industriales ya que trabajan en conjunto con empresas productoras, que prefieren mantener en privado sus proporciones de mezclas [47]. De todas formas se desprende una lógica empleada para la mezcla de los componentes que componen a los MMC, de publicaciones y guías de fabricación del material, como [62] y [63].

Para lograr un crecimiento óptimo, se recomienda que la el volumen de inóculo sólido esté entre el 10 % y 33 % de la mezcla total con el sustrato [37]. Wimmers *et al.* plantean que un 65 % de humedad contenida en el sustrato (relativa al punto de saturación) tiene mejores resultados de crecimiento que 45 % [48], lo que coincide con Jones *et al.* , que define que los niveles de actividad de agua (misma medida que la anterior) ideales para el cultivo se encuentran en el rango entre 60 % y 80 % [37]. El nivel de actividad de agua depende de la capacidad del sustrato de retener líquido, lo que tiene efecto también sobre la cantidad de agua disponible para el crecimiento del Fungi [49]. Por esto, el volumen de inóculo a un 10 % del volumen total, y contenido de agua en un 80 % de la capacidad máxima de retener agua

del sustrato fueron las bases para la proporción de mezcla en la etapa experimental de esta memoria.

Se ha probado en la etapa de mezcla adicionar como aditivo fibras orgánicas como revestimiento o como soporte interno para el material. La capacidad de degradación de los hongos utilizados en estos estudios permitieron la incorporación de estas fibras al material, resultando en mejoras en resistencia a la tensión y torsión [24]. También en esta etapa se ha probado el uso de residuo industrial de vidrio molido, en forma de polvo o pequeños granos. Al incorporarlo a la mezcla en proporciones de hasta 70 % [m/m] respecto a la masa del sustrato se han obtenido MMC con mejoras en propiedades de resistencia al fuego [76]. Tanto las fibras orgánicas (arpillera de yute) como el vidrio molido son utilizados como aditivo en la etapa experimental de la presente memoria.

Condiciones de crecimiento y secado

Varios estudios indican que la temperatura y humedad de cultivo varían por especie de hongo, sustrato y duración objetivo del periodo de cultivo [11], [14], [37]. La mayoría de las especies utilizadas son capaces de crecer en temperaturas entre 15°C y 40°C. En los experimentos en literatura el cultivo se realiza entre 21°C y 28°C. La humedad usada para el cultivo varía entre 50 % y 95 %. Los periodos de cultivo van desde los 14 a 28 días [62], [63].

La fermentación sólida del micelio se resume en la Figura 2.5. A pesar de que el CO₂ se muestra como un flujo de salida de su crecimiento, se ha demostrado que para especies del género *Pleurotus* concentraciones altas de CO₂ (*i.e.* entre 16 % y 22 %) estimulan el crecimiento de la capa externa del micelio. Se ha mostrado también que a estas concentraciones, sumado con condiciones semianaeróbicas, el micelio logra crecer en sustrato no esterilizado sin contaminación, al generar un ambiente selectivo a para las tres especies estudiadas por Zadrazil (entre ellas *Pleurotus ostreatus*) [50].

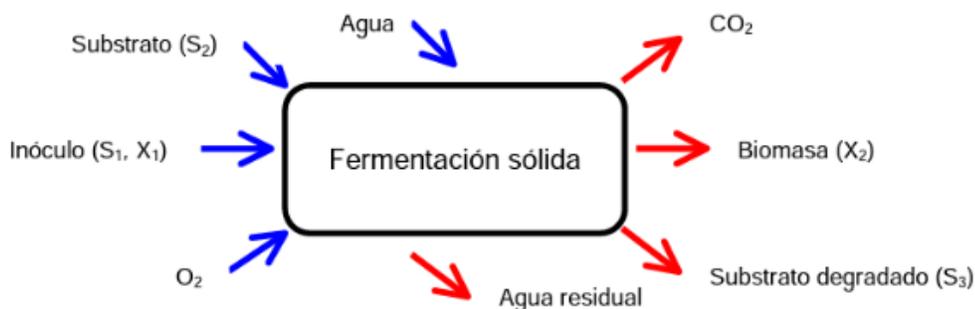


Figura 2.5: Diagrama de flujos involucrados en la fermentación sólida del micelio.

Tanto en los manuales de fabricación de MMC [62], [63], como en algunas publicaciones [23], [25], los materiales fueron retirados de sus moldes durante el cultivo para lograr un crecimiento de micelio homogéneo en las caras externas y reforzar la red miceliar en los lados que en un principio se encontraban en contacto con el molde. Se ha visto en estudios de micología sobre colonización que dañar al micelio durante el cultivo estimula el crecimiento de la parte

de la red dañada [15], [51]. Este efecto sucede en la capa externa al desmoldar el micelio. Por estas razones se incluyó el proceso de desmoldado en la producción de MMC en esta memoria.

La forma más común de terminar el crecimiento del material e inactivar micelio es el secado en horno, siendo el secado al sol una alternativa común. En el horno se opta por temperaturas menores a los 100°C para evitar la carbonización del material u otras reacciones inducidas por el calor. La duración del tiempo de secado varía ampliamente entre publicaciones al variar el tamaño de las piezas y la concentración de humedad inicial [62], [63]. Se han reportado secados de hasta 72 horas a 40°C, con una etapa de 2 horas a 100°C para inactivar por completo la actividad del micelio [47]. Esta última etapa a 100°C se ha reemplazado en casos por un prensado en caliente, lo que ha aumentado la densidad final del material y a la vez aumentado las resistencias mecánicas [25]

Dada la variedad de metodologías de estudios y especies de hongos usadas en las investigaciones en torno a MMC, no se pueden concluir directamente sobre las condiciones de cultivo y las proporciones de mezcla óptimas. Una forma adecuada de plantear la optimización de la tasa de crecimiento en el cultivo, es armar matrices de parámetros como variedad de hongo, condiciones de cultivo y proporciones de mezcla, y evaluar el efecto de distintas combinaciones sobre la cinética de crecimiento del micelio [3].

2.1.4. Caracterización mecánica y física de MMC

En esta sección se presenta información recopilada sobre las propiedades físicas y mecánicas de los MMC, con el fin de describir más en profundidad este material. Se muestra en la tabla 2.4 características reportadas de los MMC en distintas publicaciones, estas características son seleccionadas para permitir la comparación entre estos materiales y los aislantes convencionales.

Tabla 2.4: Tabla comparativa de las propiedades de materiales de micelio, espumas sintéticas y productos de madera. *Nota.* Extraída de [11]. Data de [15], [23], [25] y otros.

Material	Densidad [kg/m ³]	R. flexión [MPa]	R. compresión [MPa]	Resistencia al fuego	Conductividad térmica [W/mK]	Absorción acústica [NRC]	Tiempo de producción
MMC	59 - 552 +	0,05 - 0,09 -	0,17 - 1,1 -	+	0,04 - 0,18 +	70 - 75 % ++	semanas -
EPS	11 - 50 ++	0,07 - 0,70 -	0,03 - 0,69 -	-	0,03 - 0,04 ++	20 - 60 % +	horas ++
PU	30 - 100 ++	0,21 - 57 +	0,002 - 48 +	-	0,006 - 0,8 +	20 - 60 % +	horas ++
PF	35 - 120 ++	0,38 - 0,78 -	0,2 - 0,55 -	++	0,03 - 0,04 ++	n/a	horas ++
MC	460 - 680 -	35 - 78 ++	8 - 25 ++	-	0,3 - 0,5 -	0,1 - 0,23 -	horas ++
MB	440 - 600 -	9,9 - 11,5 ++	35 - 43 ++	-	0,08 - 0,3 +	0,05 - 0,15 -	horas ++
MD	850 - 1030 -	10,3 - 11,5 ++	68 - 83 ++	-	0,2 - 0,5 -	0,05 - 0,15 -	horas ++

Leyenda. MMC: Materiales de micelio compuestos, EPS: Poliestireno, PU: Poliuretano, PF: Resinas fenólicas,

MC: Madera contrachapada, MB: Madera blanda, MD: Madera dura.

Escala de comparación relativa de mejor a peor: ++, +, -, -.

Conductividad térmica

La conductividad térmica corresponde a uno de las características más relevantes para el uso de los MMC como aislante térmico en la construcción. Distintos estudios han caracterizados estos materiales, probando variedad de sustratos, sepas de hongos y procesos de producción. La conductividad térmica es más favorable a menores valores, esta tiene una correlación principalmente con la densidad del material y en menor medida con la humedad contenida en esta, donde a menor densidad o humedad, menor conductividad [15], [11], [24], [28]. Un aumento, por ejemplo, del 67 % de la densidad del concreto de cáñamo (un material compuesto bio-basado compuesto de cáñamo, agramiza y cal) resulta en un aumento del 54 % de la conductividad térmica del material, mientras que un aumento del 90 % de la humedad relativa (desde completamente seco a 90 % HR) resulta en un aumento de conductividad térmica entre 15 y 20 % [11]. La fuerte correlación entre la densidad y la conductividad térmica es producto de la presencia de burbujas de aire seco en los materiales de menor densidad, al tener el aire una muy baja conductividad ($26,2 \times 10^{-3}$ [W/m·K] a 0,1 [MPa] y 300[K]) [11].

Este efecto está fuertemente relacionado al tipo de sustrato y a los mecanismos de procesamiento como se explicó en la sección anterior. Por ejemplo Elsacker *et al.* comparan los valores de conductividad térmica obtenidos en su experimento, llegando a un mínimo de 0,0404 [W/(m·K)], a los de Xing *et al.*, que obtienen un valor mínimo de 0,078 [W/(m·K)] [74], y de Yang *et al.*, con un valor mínimo de 0,05 [W/(m·K)] [75]. Se le atribuye esta diferencia en ambos casos a las diferencias de formas de procesamiento, en el caso de [74] se cultivó la especie *Ipex lacteus* en aserrín fino de abedul (*Betula neoalaskana*), lo que generó MMC de densidades altas, entre 180 y 380 [kg/m³]. El proceso de Yang *et al.* generó MMC de densidades más bajas, entre 51 y 62 [kg/m³], al inocular paja de trigo con especies de hongos como *Oxyporus latermarginatus*, *Megasporoporia minor* y *Ganoderma resinaceum*, lo que resultó en un menor valor de conductividad que el de Xing *et al.*, pero mayor a los de Elsacker *et al.*, siendo una posible explicación la diferencia generada por la sepa de hongo. En cualquier caso las propiedades de conductividad térmica son competitivas, aun que aún un poco menos favorables, al compararlas con aislantes como poliestireno y poliuretano, que tienen conductividades entre 0,03 - 0,04 [W/m·K] y 0,006 y 0,18 [W/m·K] respectivamente [29].

MMC compuesto de fibras naturales como pajas y cáñamo, tienen bajas densidades (57 - 99 [kg/m³]) y conductividad térmica (0,04 - 0,08 [W/m·K]) [11], lo que lo hace competitivo comparado con aislantes convencionales como lana de vidrio (57 [kg/m³], 0,04 [W/m·K]) y XPS (34 [kg/m³], 0,03 [W/m·K]) y alternativas sustentables como lana de oveja (18 [kg/m³], 0,05 [W/m·K]) o fibras de kenaf (105 [kg/m³], 0,04 [W/m·K]) [11].

Absorción de agua y resistencia a la humedad

La absorción de agua es uno de los principales problemas de los MMC, dada su tendencia de absorber altas cantidades de agua de forma rápida. Se ha reportado un aumento de 40 % a 580 % de su peso al estar en contacto con el agua en periodos de 48 a 192 [h] [10][75]. La alta afinidad a absorber agua de los MMC se debe en parte a el sustrato lignocelulósico, que contiene numerosos grupos hidroxilos disponibles (afines al agua). También la naturaleza filamentosa del micelio y del sustrato en el material promueven la absorción de agua a causa

de la capilaridad [11]. Los materiales que solo son secados en horno presentan una mayor absorción al estar contacto con el agua que los materiales que son prensados en caliente o en frío, con aumentos de hasta 580 % de peso por absorción de agua en el primer caso comparados aumentos de hasta 250 % en los materiales prensados. La menor tasa de absorción de agua entre los MMC se observa en materiales producidos con sustratos particulados (a diferencia de los fibrosos). Appels *et al.* obtuvo un aumento de peso de tan solo 23 % a 3 [h] de contacto aumentando lentamente hasta 43 % a las 192 [h]. Este fenómeno además de atribuírsele a la forma particulada del sustrato se le asocia también a la composición de hasta 26 % [m/m] de lignina hidrofóbica en la madera de haya utilizada, y a la alta densidad (y por lo tanto baja porosidad y baja presencia de vacíos) del material [23]. La Figura 2.6 muestra las diferencias de absorción de agua en los tipos de materiales recién nombrados.

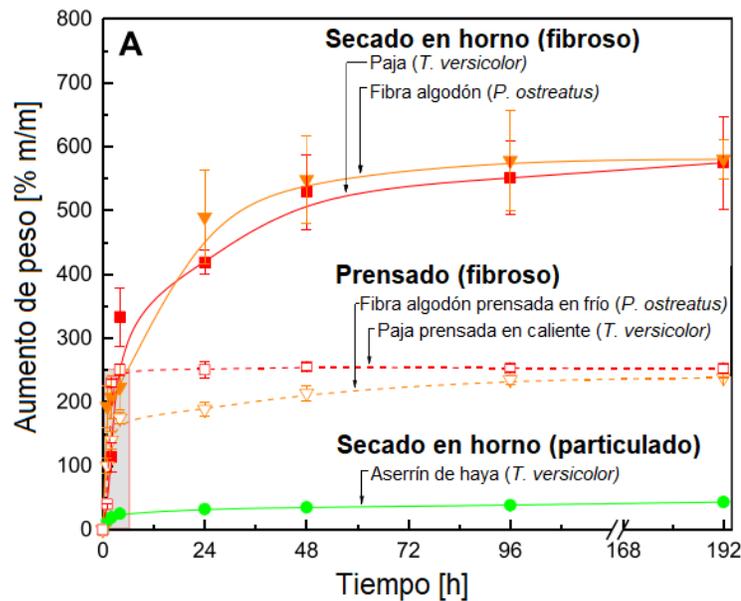


Figura 2.6: Tasa de absorción de agua de distintos MMC. *Nota.* Traducido de [23]

Densidad y resistencia mecánica

Tanto la densidad como las propiedades mecánicas del material son altamente dependientes del sustrato utilizado, ya que este actúa como una fase de relleno dispersa en el material compuesto. Las densidades de MMC en literatura suelen estar entre 60 y 300 [kg/m³]. MMC de densidades más bajas (*i.e.* 60-150 [kg/m³]) suelen estar asociadas a sustratos fibrosos como residuos agrícolas (*e.g.* paja de colza o de trigo, fibras de algodón, poda de vid), mientras que sustratos particulados como aserrín de residuos forestales suelen tener más altas densidades (*i.e.* 90-300 [kg/m³]). Las relaciones entre variables de producción y propiedades mecánicas componen un sistema complejo, difícil de predecir. Por esto, la producción con nuevos métodos y materias primas debe ser acompañada con la medición de las propiedades. El estudio de la correlación entre las variables de producción y las propiedades del material podrían servir para optimizar el proceso de producción y la selección de las materias primas.

Tabla 2.5: Densidad y resistencias a la tensión, compresión y flexión de MMC producidos con sustratos fibrosos y particulados. *Nota.* Traducido de [11]. Data de [15], [23], [25] y otros.

Tipo de carga	Tipo de sustrato	Sustrato	Densidad [kg/m ³]	E [MPa]	σ [MPa]
Tensión	Fibroso	Paja de colza	115	3,0	0,025
	Particulado	Aserrín de haya	170	13,0	0,05
		Aserrín de roble rojo	300	1,30	0,18
Compresión	Fibroso	Rastrojo de linaza	99	0,73	-
		Rastrojo de cáñamo	94	0,64	-
		Paja de trigo	192	-	0,17
	Particulado	Corteza de pino	87	0,14	-
		Aserrín de roble rojo	300	1,0	0,49
		Aserrín de roble blanco	552	-	1,1
Flexión	Fibroso	Rastrojo de algodón	130	1,0	0,05
		Paja de colza	115	1,5	0,14
	Particulado	Aserrín de haya	170	9,0	0,29

Resistencia al fuego

Distintos estudios han evaluado la resistencia al fuego de los MMC, usando distintos tipos de mediciones en variedad de MMC. Por ejemplo Jones *et al.* comparó las propiedades de degradación térmica y resistencia al fuego de MMC, hechos con cáscaras de arroz como sustrato, a las del poliestireno extruido [53]. En esta investigación evaluaron indicadores sobre la ignición, liberación de calor, pérdida de masa y liberación de gases. Todos estos reflejan distintas aristas del comportamiento de los materiales frente a un incendio. Los resultados, presentados en la Tabla 2.6, muestran los valores de estos indicadores al exponer los materiales a un fuego que simula un incendio ya desarrollado según la norma ISO 5660 (*i.e.* flujo de calor incidente de 50 [kW/m²]).

Tabla 2.6: Resumen de parámetros de calorimetría [53].

Material	Tiempo a ignición [s]	Flujo máx. de calor [kW/m ²]	Calor total liberado [mJ/m ²]	Gases totales liberados [m ² /m ²]
XPS	7	536	21	1146
MMC	9	133	45	50



Figura 2.7: Formación de ceniza sobre MMC al exponerse al fuego [53].

Los resultados presentados en la Tabla 2.6 indica la superioridad del MMC probado en términos de seguridad contra el fuego. La diferencia de tiempo a la ignición, aún que baja, muestra la menor facilidad del MMC a combustionar. Una diferencia clave en el comportamiento de los dos materiales es la formación de ceniza, la cual se presentó en el MMC de forma abundante como muestra la Figura 2.7. La formación de esta capa explica la diferencia en los parámetros de flujo máximo de calor, calor total liberado y gases totales liberados entre los dos materiales. Al formarse esta capa, la ceniza previene la liberación de fragmentos pequeños de material que generan humo. El XPS, al combustionar genera una capa despreciable de ceniza y prácticamente la totalidad del material se libera en forma de humo. Además la ceniza tiene una baja conductividad térmica, lo que genera un aislante que retrasa la combustión del resto del material.

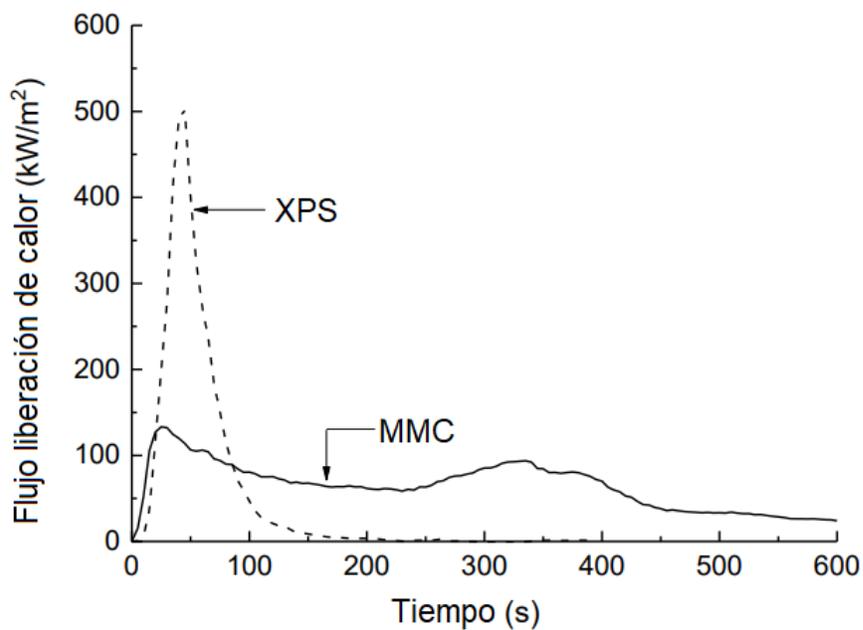


Figura 2.8: Flujo de liberación de calor MMC y XPS frente a prueba de resistencia al fuego [53].

La Figura 2.8 muestra la liberación de calor de cada material durante su exposición al fuego. Como se aprecia, el XPS libera toda su energía antes de los 250 [s], alcanzando un alto *peak* de 536 [kW/m²] antes de los 100 segundos. Esto se explica por el fenómeno mencionado anteriormente de la liberación de su masa en forma de humo. Al momento de un incendio esto es peligroso al exponer a los residentes a material particulado tóxico, además de propiciar

las condiciones para que los materiales adyacentes entren también en combustión. Los MMC tienen un calor total liberado mayor, pero se distribuye de una forma que es más segura para efectos de un incendio, el *peak* prácticamente cuatro veces menor que el del XPS hace más difícil la propagación del fuego, y como se muestra en la Tabla 2.6 la liberación de gases es mucho menor, haciéndolo más seguro para los usuarios. Estos resultados son extrapolables a los MMC en general, que han demostrado seguridad frente al fuego superior a la de los aislantes hechos en base a petróleo en varios reportes, que son conocidos por los riesgos asociados a su uso frente a los incendios [24], [26], [53].

2.2. Aislantes como producto de construcción

2.2.1. Normativas y regulación

El Instituto de la Construcción tiene un rol fundamental en la elaboración y el mejoramiento de la normativa de la construcción en Chile. Esta es una corporación privada fundada en 1996, única en el mundo por su composición transversal. Convergen aquí ministerios, constructoras, inmobiliarias, industrias, colegios profesionales, universidades y la academia. Los actores trabajan en una mesa transversal donde definen temas de interés del país. El Ministerio de Justicia le concedió al instituto personalidad jurídica y aprobó sus estatutos mediante el decreto número 1.115, aprobado el 31 de octubre de 1996 [52]. Este instituto ha participado activamente en el desarrollo de los tres tipos de instrumentos que regulan a la construcción y a sus actores. Los primeros son las leyes, promulgadas por el poder legislativo, estas contienen disposiciones generales, de la planificación urbana, de la construcción, de las viviendas sociales y el título final, segundo las disposiciones reglamentarias, que regulan procesos administrativos, estándares, etc. elaborados por el Ministerio de Obras Públicas y el MINVU, y tercero las normas técnicas, en su mayoría definidas por el INN, que definen las características técnicas para el cumplimiento de los estándares. De estos instrumentos las leyes y reglamentaciones son de carácter obligatorio a nivel nacional, excepto por unas reglamentaciones con alcance regional. Las normativas son en principio voluntarias a no ser que estén señaladas en reglamentos o contratos [52].

De los instrumentos recién nombrados los principales son los siguientes. Entre las leyes está la Ley General de Urbanismo y Construcción, promulgada en 1975, y el decreto fuerza ley 458 del MINVU, también promulgado en 1975. Entre las disposiciones reglamentarias está la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que fue el decreto supremo número 47 del MINVU, promulgado el año 1992. Este contiene disposiciones generales de la planificación, de la urbanización, de la arquitectura, de la construcción, y el reglamento especial de las viviendas sociales. Las normativas técnicas son similares a la base de una pirámide en este sistema, siendo un apoyo para el cumplimiento de las leyes y reglamentos. En específico el capítulo F sobre construcción del INN, allí hay normas de carácter general, de diseño arquitectónico, cálculo y ejecución de estructuras, acondicionamiento ambiental, seguridad, materiales y componentes, instalaciones, herramientas y equipos, y mobiliario. Para el 2015 existían aproximadamente 1200 normas técnicas relacionadas con la construcción, directa o indirectamente, de las cuales 350 eran de carácter obligatorio [52].

A raíz del terremoto del 27 de febrero del 2010 surgieron otras normativas de forma inédita, las normas técnicas MINVU (NTM), que en ciertos casos fueron instauradas a través

de un decreto supremo presidencial, dada su importancia en el contexto de la recuperación de la infraestructura frente al terremoto. El 2011 surgió también, a raíz de una modificación de la Norma Chilena (NCh) en el INN, dos formas nuevas de presentar normas en el país, primero a través del comité espejo de la ISO (imitando a la ISO, un organismo internacional de normas técnicas) y a través de la Organización Sectorial que Estudia Normas (OSEN). Así actualmente las normativas que son formuladas en Chile se clasifican en dos categorías, las normas técnicas chilenas y las normas técnicas oficiales, las normas publicadas por los entes recién nombrados se hacen oficiales solo si son incluidas en un reglamento a través de un decreto supremo del MINVU [52]. Se describen a continuación algunas de las normas y reglamentaciones chilenas más relevantes para la aplicación de los materiales aislantes. Su consideración es clave para la aplicación de MMC como productos de construcción.

NCh853 - Acondicionamiento térmico – Envoltura térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.

Esta norma establece los procedimientos de cálculo para determinar las resistencias y transmitancias térmicas de elementos constructivos, en particular los de la envoltura térmica, tales como muros perimetrales, complejos de techumbres y pisos, y en general, cualquier otro elemento que separe ambientes de temperaturas distintas [54].

Los valores determinados según esta norma son útiles para el cálculo de transmisión de calor, potencia de calefacción, refrigeración, energía térmica y aislaciones térmicas de envolventes en la edificación [54].

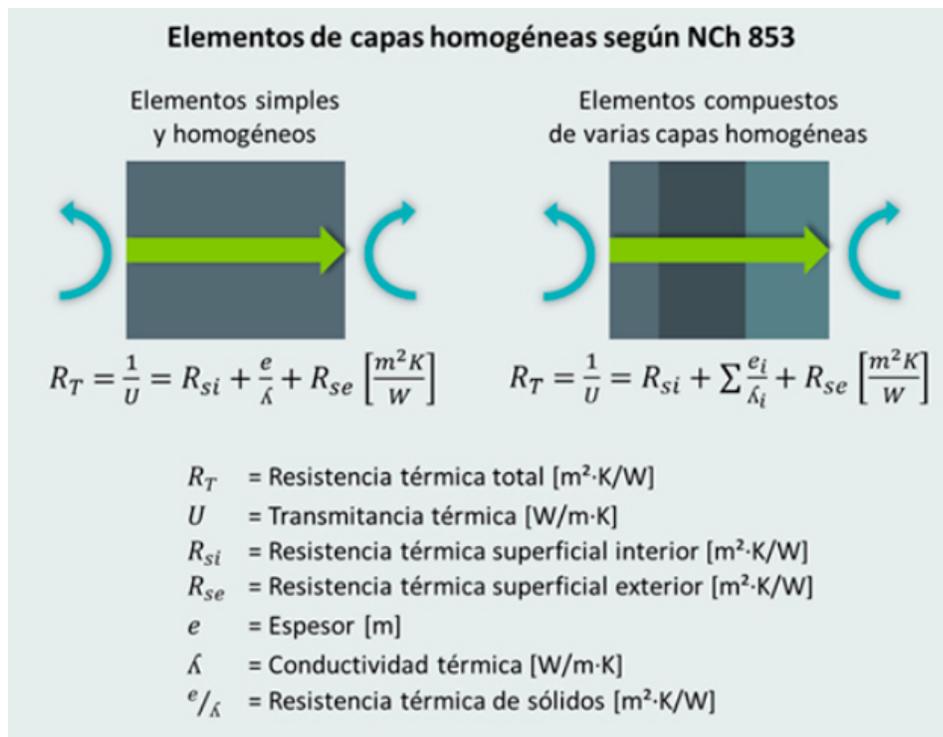


Figura 2.9: Diagrama del cálculo de resistencia térmica, según método de la NCh853. *Nota.* imagen extraída de [54].

El cálculo según esta norma es una de las alternativas que ofrece la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) para demostrar el cumplimiento de la **Reglamentación Térmica** (OGUC Artículo 4.1.10). En el sistema chileno de **Calificación Energética de Viviendas**, el cálculo de los valores U de la envolvente de acuerdo a esta norma es un ejercicio imprescindible [54].

OGUC - Artículo 4.1.10 - Todas las viviendas deberán cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico

Los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, deberán tener una resistencia térmica total (Rt) igual o superior, a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura, de acuerdo con los planos de zonificación térmica aprobados por resoluciones del MINVU (Anexo A) y a la Tabla 2.7 [55].

Tabla 2.7: Requisitos de resistencia térmica (Rt) de la envolvente de viviendas. *Nota.* Extraído de [55].

Zona	Techumbre Rt [m ² K/W]	Muros Rt [m ² K/W]	Piso ventilado Rt [m ² K/W]
1	1,19	0,25	0,28
2	1,67	0,33	1,15
3	2,13	0,53	1,43
4	2,63	0,59	1,67
5	3,03	0,63	2,00
6	3,57	0,91	2,56
7	4,00	1,67	3,13

Se entregan en este artículo de la ordenanza especificaciones adicionales para cada parte de la envolvente de la vivienda. Algunas relevantes son por ejemplo que tanto para techumbres y muros es requisito que los aislantes térmicos solo estén interrumpidos por elementos estructurales o tuberías para evitar puentes térmicos. Otra consideración interesante es que para muros, al incorporar materiales aislantes, la solución constructiva deberá considerar barreras de humedad y/o vapor, según el tipo de material aislante incorporado y la estructura considerada [55]. Este último punto abre el potencial de desarrollo de un segundo material sustentable que cumpla como capa aislante de humedad, con esto se consigue el cumplimiento del reglamento además de potencialmente suplir una de las debilidades que los MMC presentan actualmente.

La **Certificación Energética de Viviendas** se basa en los datos presentados en la Tabla 2.7, donde su escala de eficiencia energética califica a las viviendas con una nota E cuando cumplen exactamente lo requerido por la tabla, y con mejor nota para mayores resistencias térmicas (la escala de evaluación va desde A+ hasta E, siendo esta última la menos eficiente). Este es un instrumento de uso voluntario que además considera requerimientos de calefacción, enfriamiento, iluminación y agua caliente sanitaria.

Ley 21445 - Ley Marco de Cambio Climático

Esta ley establece como meta que el país sea carbono neutral y resiliente al clima a más tardar el 2050. En este contexto la ley da un lineamiento y definiciones sobre las cuales trabajar. Para implementar cambios se exige la elaboración de Planes Sectoriales de Adaptación que son el conjunto de acciones y medidas específicas a los sectores con mayor vulnerabilidad e incidencia sobre el cambio climático. Su elaboración queda delegada a los ministerios correspondientes. La ley define sectores como recursos hídricos, salud, minería, energía, silvoagropecuario, entre otras. En este caso es de interés el de ciudades, cuya elaboración es correspondiente a el MINVU [56].

En el contexto del Plan Sectorial de Adaptación de ciudades, el enfoque está en lograr adaptar viviendas a las condiciones del cambio climático y reducir el impacto en emisiones y contaminantes de las mismas. Para esto la Certificación Edificio Sustentable (CES) en conjunto con el MINVU y otras instituciones, partieron por hacer las definiciones básicas de sustentabilidad en viviendas, para así poder medir las deficiencias que existen el sistema actual. Tras el estudio de reglamentaciones y definiciones en nueve países, se llegaron a las siguientes definiciones [57]:

Edificio de Consumo Energético Neto Cero (ECENO): Edificio que gracias a su diseño pasivo logra un alto rendimiento energético, y su energía anual neta consumida es cubierta por fuentes de energía renovables generadas en el sitio o cercana a este.

Edificio Carbono Neto Cero (ECNO): Edificio de carbono neto cero, que durante su ciclo de vida (producción, construcción, operación, fin de vida útil), logra minimizar sus emisiones de carbono incorporado y compensar cualquier saldo de carbono restante.

Se definen también las etapas de ciclo de vida consideradas en edificaciones [57]:

1. Proceso de manufactura de materiales.
2. Transporte de materiales a sitio del proyecto.
3. Proceso de construcción en sitio.
4. Uso y mantención edificio terminado.
5. Energía y agua operacional.
6. Fin de ciclo de vida.

Actualmente en Chile el 22 % de la energía primaria se destina a la edificación en su ciclo de vida completo. Una de las principales metas planteadas por la **Política Energética** de Chile al 2050 es que el 100 % de las edificaciones nuevas, residenciales y no residenciales, sean ECENO. Esto parte desde un aspecto técnico profesional de diseño de las edificaciones, como menciona la definición de ECENO. Desde ahí se plantean las siguientes estrategias para la reducción además del carbono contenido. Primero la reutilización de edificaciones existentes, segundo la reducción de intensidad en materiales a través de optimización de sistemas estructurales y de material de terminación, tercero la sustitución de productos de construcción por otros de menor intensidad o que capturen carbono, y cuarto la reducción de residuos. Todo esto sumado se traduce en la reducción de carbono incorporado en las edificaciones, el carbono restante se tiene que compensar para lograr ECNO. Todo esto se ha traducido en nuevas normativas que buscan facilitar la reducción del consumo de energía en el sector de

construcción y las viviendas, algunas de estas se nombran a continuación [57].

NCh3048/1 Sostenibilidad en la construcción - Indicadores de Sostenibilidad - Parte 1: Marco para el desarrollo de indicadores para edificios.

NCh3049/1 Sostenibilidad en la construcción - Marco para los métodos de evaluación del desempeño ambiental de las obras de construcción - Parte 1: Edificios.

NCh3149 Diseño ambiental de edificios - Eficiencia energética - Terminología.

2.2.2. Estándares internacionales de medición

Esta sección resume los estándares utilizados en distintas publicaciones para medir las propiedades de aislación y mecánicas de los MMC. Se presenta para cada propiedad distintas pruebas, las que han mostrado presentar variabilidad entre los resultados. Por esto y por las diferencias prácticas de los métodos de medición se debe evaluar previamente el método a utilizar para medir las propiedades del material estudiado.

Al igual que el INN, las asociaciones ASTM, NBN e ISO redactan normativas estandarizadas que sirven para asegurar la calidad de procesos y mediciones. La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) proviene de EEUU, la NBN (*Bureau voor Normalisatie*) de Bélgica y la ISO (*International Organization for Standardization*) es reconocida de forma internacional. Esta última es especialmente importante ya que permite reducir barreras de calidad en el comercio internacional.

Tabla 2.8: Estándares de medición de conductividad térmica utilizados en literatura. *Nota.* Data de [3].

Estándares de medición de conductividad térmica		Referencias
ASTM D5334	Método de medición estandarizado para la determinación de conductividad térmica de suelos y rocas suaves mediante procedimiento de probeta de aguja térmica.	[14]
NBN EN 12667	Determinación de resistencia térmica mediante método de placa caliente con guarda y medición de flujos de calor - Para productos de alta o media resistencia térmica	[24]
ASTM C518-17	Método de medición estandarizado para propiedades de transmisión térmica en estado estacionario mediante aparato de medición de flujo de calor.	[24]

Tabla 2.9: Estándares de medición de absorción de agua utilizados en literatura. *Nota.* Data de [3].

Estándares de medición de absorción de agua		Referencias
ASTM C1134	Método de prueba estandarizado para retención de agua de aislantes térmicos rígidos luego de inmersión parcial.	[24]
ASTM C1585-04	Método de prueba estandarizado para medición de tasa de absorción de agua de concreto hidráulico.	[14]
NBN EN ISO 15148	Rendimiento higrotérmico de materiales de construcción y productos - Determinación de coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial.	[14]

Tabla 2.10: Estándares de medición de densidad y resistencia mecánica utilizados en literatura. *Nota.* Data de [3].

Estándares de medición de densidad y resistencia mecánica		Referencias
ASTM C165	Método de prueba estandarizado para medición de propiedades de compresión de aislantes térmicos.	[24]
ASTM D-792	Método de prueba estandarizado para medición de densidad y gravedad específica (densidad relativa) de plásticos por desplazamiento.	[14]
ASTM D3501	Método de prueba estandarizado para paneles estructurales de madera en compresión.	[15]

2.2.3. Fenómenos de transferencia

Para el diseño de cubiertas aislantes en edificaciones se tiene en cuenta que el traspaso de calor entre el interior y exterior ocurre de tres modos, por convección, conducción y radiación. La comprensión y el moldeamiento de los fenómenos de transferencia asociados a los materiales aislantes se logra mediante las ecuaciones que se muestran a continuación. Estos modelos matemáticos fueron simplificados utilizando aproximaciones y condiciones de borde, por lo que los flujos resultantes son aproximaciones de las reales.

Transferencia de calor, Ley de Fourier

La Ley de Fourier define que el flujo de transferencia de calor a través de un material es proporcional al gradiente negativo de la temperatura, como se muestra en la ecuación 2.1.

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}, q_y = -\lambda \frac{dT}{dy}, q_z = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (2.1)$$

Donde $q_{x,y,z}$ = flujo de calor [W/m^2], λ = conductividad térmica [$W/(m \cdot K)$], T = temperatura termodinámica [K].

Esta ecuación resulta fundamental para la determinación de flujos de calor en problemas de relaciones experimentales. Cuando las gradientes de conductividad térmica son conocidas y constantes en cada material, se pueden determinar los flujos de calor con tan solo las diferencias de temperatura en cada cara del material. El cálculo se complica en casos de materiales anisotrópicos como los MMC, ya que estos tienen gradientes de conductividad térmica irregulares. La conductividad térmica [$W/(m \cdot K)$] es una propiedad esencial de los materiales aislantes, una mayor conductividad térmica significa un mayor traspaso de energía, considerando constantes otras variables.

Traspaso de humedad, Ley de Fick

El traspaso de humedad presenta un sistema más complejo que el de los de traspaso de energía y calor, principalmente porque los gradientes que determinan el traspaso son dependientes de más parámetros y condiciones [3]. La difusión de humedad generada por la presión de vapor, depende de las diferencias de temperatura y humedades presentes entre dos espacios

adyacentes. En el caso de edificaciones se considera la ecuación 2.2, del traspaso de humedad entre dos interfaces de material.

$$j_x = -\mu \frac{dP_v}{dx}, j_y = -\mu \frac{dP_v}{dy}, j_z = -\mu \frac{dP_v}{dz} \quad (2.2)$$

Donde $j_{x,y,z}$ = flujo de humedad [$mol/(m^2 \cdot s)$], P_v = presión de vapor [mol/m^3], μ = permeabilidad a la humedad del material [$m^2 \cdot s$].

La permeabilidad (μ) corresponde a cuanta humedad el material deja pasar, siendo más alto para materiales porosos, y viceversa en el caso de materiales impermeables. El gradiente de presión de vapor (P_v) depende de la temperatura y la humedad absoluta. Según las leyes de gases ideales y la Ley de Dalton, la presión parcial es proporcional a la temperatura, y la presión total generada por una mezcla de gases es la suma de las presiones parciales de cada gas. Las presiones parciales del vapor de agua y del aire son diferentes dada las diferencias de peso molecular. Con esto, la humedad absoluta a una temperatura (K), a una atmósfera de presión ($\approx 10^5 Pa$) está determinada según indica la ecuación 2.3.

$$x \approx \frac{P_v/(R_v \cdot T)}{P_a/(R_a \cdot T)} \quad (2.3)$$

Donde x = humedad absoluta [kg vapor de agua/ kg aire seco], P_v = presión parcial vapor de agua [Pa], P_a = presión parcial del aire [Pa], T = Temperatura [K], $R_{v,a}$ = constante de gas de vapor y de aire, 462 y 287 [$J/(kg \cdot K)$] respectivamente.

La humedad absoluta (x) corresponde a la concentración de vapor de agua en el aire, que está sujeta a cambios por variaciones en la presión y temperatura. En cálculos para edificaciones la presión atmosférica se considera igual a 1 [atm], lo que sirve para determinar el punto de condensación de la humedad en el aire. Entonces para una temperatura dada, existe una presión de vapor (P_v) máxima en la que desde ese punto acumulación adicional de agua en el aire se condensa, esta presión es llamada presión de saturación (P_{sat}). La relación entre la presión de saturación (P_{sat}) y la humedad relativa (HR) a una temperatura dada (K) se sintetiza en la ecuación 2.4. Esta señala como a 100% de humedad relativa a una cierta temperatura, el aire está saturado con agua.

$$HR[\%] = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (2.4)$$

Estas variables de condiciones higroscópicas son la base para determinar la humedad al interior de un edificio. Factores como el clima, la ventilación y la tasa de producción de humedad de los ocupantes afectarán los niveles de humedad relativa dentro de estos. Los materiales aislantes se ven sometidos en su interfaz a la condensación y al vapor de agua contenido en el aire. La inercia higroscópica de los estos materiales resulta influyente en la

mantención de un equilibrio higroscópico dentro de los edificios.

Inercia higroscópica y capacidad de amortiguamiento de humedad

El mantenimiento de condiciones higrotérmicas adecuadas depende que se alcance un equilibrio entre los flujos de humedad entrantes y salientes. Dicho equilibrio, en un régimen dinámico, vendrá determinado por la inercia higroscópica de los espacios interiores. Esta se define como la capacidad de los materiales de absorber, almacenar y emitir humedad desde y hacia los alrededores [58]. Estudios han mostrado que industrias de construcción están interesadas en materiales que puedan regular pasivamente la HR y reducir las cargas máximas de ventilación requerida por variaciones diarias o estacionales [59].

Materiales porosos como los MMC y otros aislantes tienen la capacidad de almacenar agua en su interior. La capacidad de intercambio de humedad con el medio depende de tres fuerzas motoras. Primero la HR del entorno, segundo la succión capilar dentro de los poros del material y tercero el gradiente de presiones parciales [60]. De entre estos la succión capilar es el factor propio del material que requiere ser determinado para evaluar la capacidad de amortiguamiento de humedad de la envolvente del edificio.

Normalmente la succión capilar dentro de los poros de un material es determinada por curvas de retención de humedad, que corresponden a un gráfico de contenido de humedad en función de succión capilar (Pa) en mediciones estáticas de laboratorio. Las condiciones estáticas de medición (que solo incluyen desorción) han mostrado discrepancias con métodos de medición dinámicos (que incluyen absorción y desorción), y se ha demostrado que estas últimas son preferibles para determinar capacidad de amortiguamiento de humedad de materiales de construcción dado el régimen variable en el que estos operan [59], [60]. La medición del *Moisture Buffer Value* (MBV) es uno de los métodos de medición dinámicos de la capacidad de un material de regular la humedad en el medio. La medición se basa en la determinación del MBV_{ideal} que se define como el intercambio de humedad resultante de la variación periódica de esta misma, normalizada al cambio de humedad relativa en la superficie del material [59]. La efusividad de humedad (b_m en $[kg/(m^2 Pa \sqrt{s})]$) se define para el cálculo de MBV según la ecuación 2.5.

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{d\mu}{d\phi}}{p_{sat}}} \quad (2.5)$$

Donde δ_p = permeabilidad al vapor de agua $[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$, ρ_0 = densidad seca del material $[kg/m^3]$, μ = contenido de humedad $[kg/kg]$, ϕ = humedad relativa [-], p_{sat} = presión de saturación de vapor $[Pa]$.

Para la medición de este caso ideal, la presión de saturación de vapor (p_{sat}) está dada por las condiciones de prueba, mientras que las otras variables están relacionadas a propiedades estándar del material. Para el cálculo de MBV_{ideal} en función de la efusividad de humedad (b_m) el método estandarizado de NORDTEST propone una aproximación, presentada en la ecuación 2.6. Esta se construye a partir de una serie de Fourier de variables sinusoides en función del tiempo ($T_p = T_1 + T_2$) que mide el cambio de humedad en el material sobre

tiempo de exposición bajo variaciones periódicas de HR. En $T_1 = 8$ horas la HR es alta igual a 75%, en $T_2 = 16$ horas la HR es baja igual a 33%; con esto T_p , la condición de borde, resulta en 24 horas. La variación periódica utilizada para la aproximación de MBV_{ideal} en $[g/(m^2 \%RH)]$ se muestra en la figura 2.10.

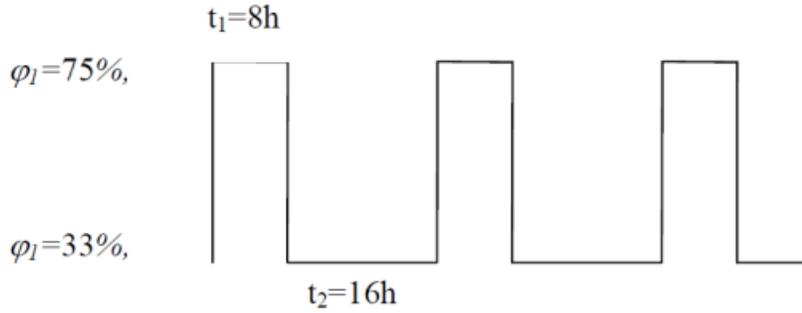


Figura 2.10: Variación periódica de las condiciones de borde para determinar MBV_{ideal} . Nota. Extraída de [59]

$$MBV_{ideal} \approx \frac{G(t)}{\Delta RH} = 0,00568 \cdot p_{sat} \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (2.6)$$

Este valor ideal finalmente resulta como un punto de comparación para distintos materiales, donde a mayores valores se tendrá mayores índices de intercambio de humedad. En condiciones de operación reales la variabilidad de HR no será periódica ni variará discretamente entre dos valores, por lo que el valor de MBV_{ideal} no podrá cuantificar la humedad intercambiada con el medio, pero si sirve como punto de comparación entre materiales. Existe la medición de MBV práctico del material en condiciones puntuales, puede resultar de interés su determinación para un material en caso de querer evaluar ciertas condiciones específicas. La empresa NORDTEST presenta un método estandarizado para la medición de tanto el MBV_{ideal} como el $MBV_{practico}$.

2.3. Dificultades en implementación de MMC

Los MMC han mostrado resultados prometedores como materiales de construcción, principalmente por sus propiedades de aislación térmica y de resistencia al fuego. Parámetros como los sustratos utilizados, las especies de hongo, las condiciones de cultivo o el post procesamiento afectan las propiedades de los MMC. Las posibles combinaciones e innovaciones en torno a estas y otras variables expanden el horizonte de estos materiales que se encuentran actualmente en etapas tempranas de desarrollo. Los métodos de evaluación del material y las técnicas de medición de sus propiedades son muy variadas entre publicaciones, lo que dificulta el análisis y comparación de resultados [3], [14]. Esto hace que obtención de información relevante sobre el estado de desarrollo del material se encuentre limitada. Además de este problema en torno a la metodología de investigación, el escalamiento, la definición de métodos de producción y temas de durabilidad del material aun no han sido suficientemente desarrollados en la investigación científica.

Producción y escalamiento

Los MMC se encuentran aún en una etapa de desarrollo temprano. El material requiere perfeccionamiento más allá de las aplicaciones específicas que se le puedan dar y lograr optimizar su proceso de producción requiere de un esfuerzo que involucre distintas disciplinas. Factores sobre la producción de los MMC como las características propias de los hongos utilizados, hasta aspectos de diseños de equipos o recetas de mezcla son ejemplos del desarrollo que se requiere en torno al material. Un área clave en la que se necesita profundizar es la micología, el estudio de los mecanismos por los cuales el hongo y el sustrato interactúan, y las distintas características del micelio son fundamentales en el desarrollo del material. Los mecanismos biológicos por los que los hongos de podredumbre blanca degradan el sustrato han sido descritos preliminarmente y su capacidad para degradar lignina resulta favorable para la producción del material, el estudio específico de estos mecanismos puede permitir mejorar el producto y su producción en un futuro.

La biotecnología también tiene potencial de aportar en el desarrollo de los MMC. El estudio del metabolismo de distintas especies, la estructura de proteínas y enzimas relevantes, la regulación de expresión de genes o de la información genética contenida en hongos amplían el potencial de desarrollo de los materiales. En específico el estudio de la genética de los hongos y la relación con su capacidad de colonizar distintos sustratos ha sido explorada en casos puntuales [42], [43]. Aún la introducción de modificaciones genéticas o transgénicos no ha sido abordada experimentalmente en publicaciones, y se discute el balance de su impacto sobre el desarrollo del material. Por una parte puede permitir el mejoramiento de las funciones de interés mejorando el proceso de producción, pero por otra puede limitar el desarrollo del material al permitir a las empresas desarrolladoras hacerse con la propiedad intelectual de las especies modificadas, entretendiendo el desarrollo del material a una mayor escala.

La ingeniería en sus variadas formas aún se tiene que hacer parte de el mejoramiento de la producción del material. Aspectos como el diseño de equipos, la definición de sistemas de gestión, la organización de la información disponible y su uso para el desarrollo del material y la evaluación de nuevos proyectos en torno al material son algunos de los ejemplos en la que se podría involucrar. La ingeniería de procesos en específico juega un rol fundamental en la etapa en que se encuentra actualmente el material, el escalamiento del proceso requiere un comprensión tanto de la interacción de los materias primas, insumos y aditivos involucrados en la producción como de los mecanismos requeridos para mantener las condiciones de operación en su óptimo, aún cuando los procesos pasan de escalas pequeñas a unas mayores. El desarrollo de nuevos procesos unitarios para el mejoramiento de las propiedades finales del material requieren una comprensión en profundidad del proceso, lo que se logra con la experiencia en sistemas reales de producción y la comprensión de la teoría detrás de estos mismos procesos.

La aplicación de MMC como aislantes en la construcción muestra un gran potencial, el impacto que estos pueden llegar a tener estará sujeto a la cooperación de distintas disciplinas en un ambiente de conocimiento compartido y al impulso que generen industrias locales al rededor del mundo, que se espera que surjan por el incentivo de implementar economías circulares. Los materiales aislantes ocupados actualmente cumplen un rol fundamental en reducir

el consumo de energía de edificaciones y procesos, por lo que los productos de MMC deberán cumplir con los más altos estándares de calidad con el fin de poder reducir las emisiones de producción y energía contenida de los materiales utilizados, sin comprometer la eficiencia energética de las construcciones en las que se apliquen.

Durabilidad material

Los requerimientos de durabilidad y longevidad de los materiales aplicados en construcción son estrictos y exigentes. La durabilidad puede tener distintas definiciones las cuales se muestran a continuación [61]:

- La habilidad de rendir una función hasta alcanzar un estado límite.
- La reducción del desempeño funcional, luego del envejecimiento o de la evolución de propiedades, con respecto a características positivas o negativas.
- El largo de vida de un material entre la puesta en marcha de un edificio hasta su decaimiento de desempeño hasta niveles inferiores a su umbral de falla.

Los materiales de construcción sufren de distintos problemas de durabilidad. En específico la principal preocupación sobre los materiales aislantes es la transferencia de humedad en el interfaz del aislante y los componentes estructurales, dado que es en esta capa en donde se encuentran los mayores gradientes de temperatura. La transferencia de agua en forma de condensación o vapor de agua puede causar el hinchamiento o el encogimiento de los materiales aislantes. En el peor de los casos cuando estos materiales absorben agua líquida el desempeño funcional como aislante térmico disminuye drásticamente.

La principal desventaja de los MMC, al igual que otros materiales orgánicos ya existentes, es su alta absorción de agua. A pesar de que se han reportado pruebas de absorción de agua en distintas publicaciones, las inconsistencias en las metodologías de producción de los materiales y de testeo hacen difícil obtener información conclusiva. Entre las soluciones propuestas más frecuentemente sugeridas en la literatura se encuentra el uso de capas de resinas externas que sirvan como capa impermeable para el material. Esta solución presenta problemas por temas como la cohesión entre la capa de resina y el material o la durabilidad de la misma, también siendo importante el origen y la sustentabilidad de la resina en cuestión. El desarrollo del conocimiento en torno al material podría traer consigo nuevas soluciones al problema de la permeabilidad que no incluyan el uso de resinas.

El estudio publicado por Elsacker *et al.* [15] obtuvo la menor tasa de absorción de agua de MMC de entre la bibliografía revisada después de una inmersión de 24 horas del material, lo que fue atribuido a una capa externa de micelio densa y uniformemente distribuida. Esta explicación coincide con los literatura respecto a las características del micelio y del polímero de quitina extraído de hongos [17] [37]. Los métodos de empacado en el molde y tiempos totales de cultivo han mostrado tener impacto sobre las propiedades de absorción de agua del material [15]. Se ha visto que moldes y métodos de empacado que resulten en mejor intercambio de aire durante el periodo de cultivo resultan en una capa externa más densa. Periodos de cultivo más largo en condiciones óptimas también resultan en una capa de micelio externa más robusta. La modificación genética de las sepas de hongos utilizadas también podrían tener un efecto similar [43].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología general

La metodología apunta a evaluar un proyecto de producción de aislantes térmicos hechos de material de micelio a escala industrial. Para esto se define un procesos de producción principal y dos alternativos, que se ponen a prueba a través de la fabricación de prototipos. Para evaluar el proyecto se parte por el escalamiento de la producción del material, desde la escala de laboratorio, basado en la metodología experimental, a un volumen de producción industrial, definido como la fabricación de MMC suficiente para cubrir el 1 % del volumen de EPS consumido en el rubro de la construcción en Chile. Se definen los equipos necesarios para cada proceso unitario y los flujos de masa entre estos. Se dimensionan los equipos principales y se cuantifican los insumos necesarios para el procesamiento. Se estima con esta información los costos de operación e inversión asociados a cada alternativa, como también su rentabilidad a través del indicador VAN. Finalmente se estudian distintos escenarios económicos del proyecto a través de un análisis de sensibilidad.

Se ha logrado en experimentos previos la producción de bloques de materiales de micelio compuesto. Con estos se ha probado la capacidad de producir el material y ha servido para definir variables como el sustrato a utilizar (poda de viña), el tipo de hongo (*Plerotus ostreatus*), y las condiciones de cultivo (14 días a 28 °C y 80 % humedad relativa). En esta iteración se probará el uso de dos aditivos en la producción de los prototipos, el primero son fibras naturales de yute y el segundo son esquiras de vidrio. Además se probará un nuevo sustrato (tallo de haba) y un proceso de prensado en caliente en la etapa de secado (80 °C y 500 KPa de presión). Se propone para siguientes iteraciones la medición de propiedades mecánicas y físicas relevantes para la implementación del material como aislante térmico y los métodos por los cuales se determina.

3.2. Método experimental

El método experimental está enfocado a producir prototipos del material a escala de laboratorio. El proceso consta de los procesos unitarios presentados en la Figura 3.1 los cuales son descritos en detalle más adelante.

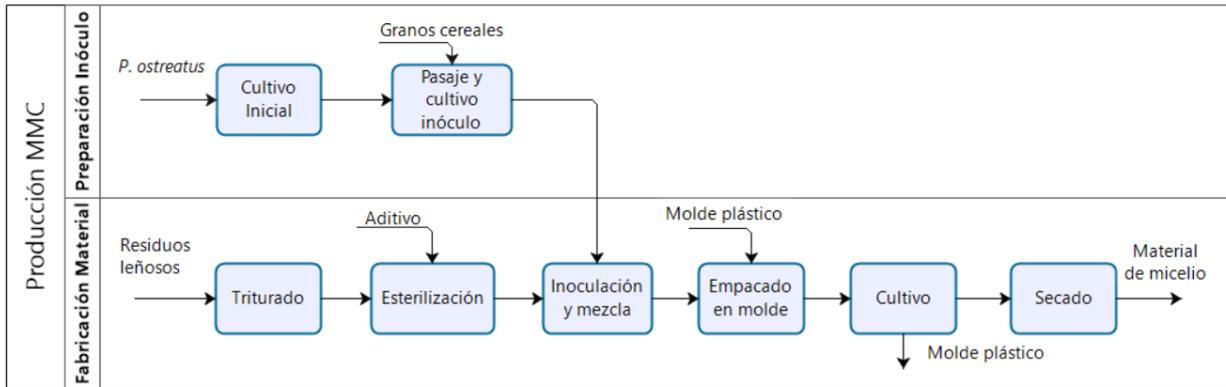


Figura 3.1: Diagrama de bloques del proceso de producción de prototipos de MMC.

3.2.1. Materiales

Micelio y sustrato

Las propiedades de los materiales producidos están relacionadas fuertemente con el tipo de sustrato y micelios utilizados para su fabricación [23]. Se optó en este caso por el uso de micelio de hongo Ostra (*Plerotus ostreatus*) tipo perla y para el sustrato se usaron dos variedades, tallo de habas (*Vicia faba*) variedad equina y poda de parra de uva tipo *Cabernet Sauvignon*. Se ha reportado que esta sepa de hongo resulta en buenas propiedades aislantes y mecánicas en la producción de MMC [11], [13], [15], y su combinación con poda de viña mostró resultados favorables en experimentos previos (Anexo B). En la Tabla 3.1 se presentan otras especies de hongos y sustratos que se podrían emplear en la producción de MMC.

Tabla 3.1: Especies Fungi y sustratos alternativos para la producción de MMC, su uso ha sido reportado en [15].

Especies Fungi	Sustratos
<i>Ganoderma lucidum</i>	Residuos forestales de pino
<i>Trametes versicolor</i>	Cascara de arroz
<i>Schizophyllum commune</i>	Rastrojo de maíz, canola o trigo

Insumos y equipos

En la Tabla 3.2 se detallan los insumos y equipos utilizados para la producción de prototipos de MMC durante el desarrollo experimental. Estos se consiguieron por cuenta personal del autor.

Tabla 3.2: Insumos y equipos utilizados para la producción de prototipos de MMC.

Insumo	Uso	Proceso	Equipo	Proceso
Poda de viña	Sustrato	Triturado	Trituradora de ramas	Trituración
Tallo de haba	Sustrato	Triturado	Olla a presión	Esterilización
Micelio de hongo en grano	Inóculo	Inoculación y mezcla	Quemador butano	Inoculación y mezcla
Etanol al 70 %	Esterilidad	Inoculación y mezcla	Termómetro	Inoculación y mezcla
Gas butano	Esterilidad	Inoculación y mezcla	Cuenco de vidrio	Inoculación y mezcla
Guantes de latex	Esterilidad	Inoculación y mezcla	Mesa de trabajo	Inoculación y mezcla
Mascarilla	Esterilidad	Inoculación y mezcla	Calefactor eléctrico	Cultivo
Implementos metálicos (cuchara)	Manipulación	Inoculación y mezcla	Humidificador	Cultivo
Cinta indicadora	Esterilidad	Esterilización	Controlador humedad	Cultivo
Vidrio molido	Aditivo	Esterilización	Controlador temperatura	Cultivo
Arpillera de yute	Aditivo	Esterilización	Carpa de cultivo	Cultivo
Moldes plásticos	Moldeado MMC	Empacado en molde		

3.2.2. Descripción del proceso

La producción de materiales de micelio es en resumen el cultivo controlado de micelios de hongo sobre un sustrato lignocelulósico. El proceso consta de varios procesos unitarios variables. Se presenta en la Figura 3.1 un diagrama de bloques que presenta los procesos unitarios dentro de grupos a los que llamaremos etapas. Se especifica a continuación la metodología de cada proceso unitario usado para la producción de prototipos en la memoria.

Etapas: Preparación Inóculo

La correcta preparación del inóculo de micelio se debe llevar a cabo en un laboratorio en condición estéril. El objetivo de esta etapa es aumentar la biomasa de micelio a partir del cultivo de esporas o tejidos de hongo. Existen varias técnicas para lograr este propósito, se describe a continuación una alternativa para la producción de inóculo de micelio en casa. En el caso de los prototipos producidos en esta memoria, esta etapa fue hecha por un proveedor local, que hace entrega del grano inoculado ([Micosеча](#)).

Proceso unitario: Cultivo inicial

Primero, se debe recolectar biomasa con potencial de replicación desde un hongo de la seta que se vaya a usar (*P. ostreatus* en este caso). Una técnica puede ser la recolección de esporas, que son los gametos de los hongos. Para esto se requiere una seta madura que esté en periodo de esporulación. Para la recolección de las esporas basta con recolectar la seta y dejarla a secar en un recipiente estéril. La seta liberará las esporas de forma natural y estas

quedarán adheridas a la superficie del recipiente, listas para recolectarlas y pasarlas a un medio de cultivo (esta alternativa genera variabilidad genética a partir de la reproducción sexual de las esporas). Otra forma de obtener biomasa a partir de un hongo es la disección de una seta. Utilizando un bisturí y en condición estéril se puede cortar por la mitad una seta recolectada y desde el interior de su tallo cortar un cuadrado de 0,5 [cm²] aproximadamente. Este tejido es micelio en alta densidad que mantiene su capacidad de replicación siempre que esté fresco. Este tejido se puede utilizar inmediatamente para la siguiente parte, la inoculación de un medio de cultivo.

Para la inoculación etapa se debe preparar un medio estéril para inocular con el tejido o esporas recolectadas en la primera parte. Se puede ocupar agar papa dextrosa (PDB) o una mezcla líquida conocida como "Honey Tek" como sustrato. En cualquier caso, el procedimiento es el mismo, inocular en condiciones estériles el sustrato con el tejido, sellar el contenedor (placa Petri para el agar o jarro de vidrio para el medio líquido) y cultivar. El cultivo se hace en un ambiente limpio, a temperaturas entre 24 y 27 °C. Al cabo de una semana aproximadamente el micelio va a haber colonizado el medio lo suficiente para realizar un subcultivo en el siguiente proceso.

Proceso unitario: Pasaje y cultivo de inóculo

El inóculo puede ser sólido o líquido, este se utiliza posteriormente en la etapa de fabricación del material. Para producir el inóculo sólido, como el que se muestra en la Figura 3.2 se esteriliza sorgo u algún otro cereal (*e.g.* avena, trigo, mijo), que se inocula con el tejido cultivado en la etapa anterior, en condición estéril y luego se cultiva a temperaturas entre 24 y 27 °C. Para la producción de inóculo líquido se realiza un pasaje desde un volumen pequeño de cultivo inicial hasta uno mas grande de medio fresco, traspasando todo el contenido desde el primero. Existe la posibilidad de realizar más de un pasaje en caso de querer tener un volumen más grande de inóculo. El tiempo de cultivo depende de las condiciones de cultivo, la cantidad de inóculo y sustrato, y el tipo de seta y sustrato, pudiendo variar entre una semana a dos meses para el cultivo sólido y líquido.



Figura 3.2: Inóculo sólido, grano de sorgo cubierto por micelio.

Etapa: Fabricación material

Se parte por la obtención de la materia prima, residuos de poda de viña y haba. Se obtuvieron para la memoria directamente desde un predio agrícola situado en la Viluma, comuna de Melipilla, Región Metropolitana.

Proceso unitario: Triturado

Existen varios posibles métodos de triturado, a escalas pequeñas se puede hacer de forma manual con distintas herramientas, a mayores escalas y para los prototipos producidos se utiliza una trituradora de ramas. El grosor de las varas obtenidas determinan la potencia de la trituradora de ramas necesaria para ser utilizada en este proceso. En la memoria se utilizó una trituradora de ramas a gasolina, de 7 [hp] de potencia. Esta fácilmente tritura varas de 5 [mm] de grosor como las utilizadas, mostradas en la Figura 3.3 a), siendo capaz de procesar varas de hasta 76 [mm] según especificaciones de catálogo. Las ramas trituradas resultantes son una mezcla heterogénea de trozos, fibras y polvo de madera, como se ve en la Figura 3.3 b).

Proceso unitario: Esterilización

La esterilización idealmente se lleva a cabo en un autoclave a 120 °C y 105 [kPa] aproximadamente, pero al no disponer este equipo se opta por el uso de una olla a presión que alcanza los 115 °C y 80 [kPa]. Se ponen los residuos triturados y los aditivo (yute y esquirlas de vidrio en este caso) en bolsas de tela separadas. Se pone una bolsa a la vez en la olla a presión y se agrega agua hasta llegar a la mitad de su capacidad. Se sella la tapa de la olla y se calienta en una cocina a gas hasta que alcance su máxima presión. Desde ahí, se baja el fuego al mínimo y se espera a que transcurran 20 minutos cuando se retira del fuego. Se deja enfriar la olla y luego se descarta el agua del interior con cuidado de no contaminar el contenido. La bolsa y su contenido están ahora esterilizados por lo que se evita manipularla con utensilios o manos no desinfectadas. Si no se pasa directamente a la siguiente etapa es necesario almacenar los elementos estériles en lugares limpios. Para comprobar la efectiva esterilización se ocupa cinta de autoclave.



Figura 3.3: a) Residuos de poda de viña, b) Poda de viña triturada dentro de olla a presión.

Proceso unitario: Inoculación y mezcla

A partir de esta etapa se trabaja en condición estéril, por lo cual es necesario esterilizar las superficies, los moldes, el lugar de cultivo y cualquier otro implemento a utilizar. Además es necesario lavar las manos, usar guantes, mascarilla y tener cuidado al manipular los implementos. Para evitar la contaminación con partículas del ambiente se prende un quemador de butano en el lugar de trabajo, el cual forma un flujo de aire hacia arriba evitando que caigan microorganismos sobre los implementos. Para que este efecto sea efectivo es necesario trabajar lo más cerca posible de la llama del quemador.

Cuando el sustrato alcance temperaturas bajo los 30 °C se puede empezar con la inoculación. No se debe estrujar el agua que el sustrato retenga del proceso de esterilización, esta es necesaria para el cultivo del micelio. Se desinfecta el cuenco donde se inoculará el sustrato y el molde para el cultivo. Se cubren los moldes con film plástico en su interior y se desinfectan rociando alcohol etílico diluido al 70 %. Para los materiales a los que se le adiciona arpillera de yute se cubre el molde con este en lugar del film plástico.

En el cuenco se mezcla el sustrato esterilizado con el inóculo de micelio en granos en una proporción 1:3 masa/masa (micelio:sustrato húmedo, existen otras proporciones de mezcla como 1:10 volumen/volumen), en el caso de adicionar vidrio molido se agrega en esta etapa en una proporción 2:3 masa/masa (vidrio:sustrato húmedo). Se mezcla el sustrato inoculado con implementos limpios, se separan los cúmulos de granos del inóculo que se hayan adherido por el micelio. Se pasa la mezcla al molde, esparciendo el contenido en su interior y presionando suavemente, aplicar mucha presión podría ahogar al micelio durante el cultivo, retardando o deteniendo su crecimiento. Se cubre el molde con film plástico esterilizado. Para los casos en que se use yute como aditivo, se cubre antes con la arpillera y luego con el film. Se adhiere el film con cinta de papel al molde y se le hacen pequeños agujeros con una aguja para permitir intercambio de gases y humedad.

Proceso unitario: Cultivo micelio.

Para el cultivo se deja el molde con sustrato inoculado en un ambiente oscuro a 27 °C y 80 % humedad relativa. Los moldes deben conservar la humedad que lleva el sustrato al momento del llenado ya que el micelio necesita entre 80 y 99 % de humedad relativa para crecer de forma óptima. Las condiciones de cultivo se mantienen constantes utilizando un humidificador y un calefactor (presentados en la Figura 3.5) conectados a controladores automáticos.

El cultivo se separa en dos partes. La primera puede demorar entre 5 y 14 días dependiendo de diversos factores, en previas iteraciones del experimento se ha demorado 7 días aproximadamente. Esta etapa se finaliza cuando la superficie superior del sustrato está cubierta por micelio en un 50 %. Esta cobertura se ve sobre el sustrato como una felpa blanca en el caso del micelio de *Plerotus ostreatus*, el grado de cobertura se determina cualitativamente durante la revisión periódica de los moldes en cultivo. La Figura 3.4 muestra el avance de uno de los moldes durante esta etapa. Extender mucho esta etapa puede resultar en la muerte de partes del micelio.

La segunda parte del cultivo comienza con el retiro del molde. Para esto se retira el ma-

terial desde el lugar de cultivo y se coloca en una superficie estéril de trabajo. Se retira el material del molde con ayuda del film plástico que se colocó entre los dos, es importante tener cuidado de no quebrar el material en este punto. Una vez retirado del molde el material debería conservar su forma. Se vuelve a ingresar el material al lugar de cultivo, se orienta su cara superior hacia abajo de manera que las caras que estuvieron en contacto con el molde queden expuestas al aire y a las condiciones de cultivo. Se mantienen las mismas condiciones de 27 °C y 80 % humedad relativa. Se cultiva entre 5 a 7 días hasta que todas sus caras estén cubiertas con micelio.



Día 3



Día 5



Día 10

Figura 3.4: Registro de nivel de cobertura de un molde durante el cultivo. Sustrato viña, sin aditivos.

Proceso unitario: Secado

Una vez el proceso de cultivo haya terminado se retira el material del lugar de cultivo con cuidado de no quebrarlo. El material debería tener cierta rigidez y cohesión. Desde este punto ya no es necesario trabajar en condiciones estériles. El objetivo de este proceso es eliminar toda la humedad que pueda tener el material, para esto se parte por colocar el material en un horno a 75 °C por aproximadamente 4 horas, volteando el material cada una hora. La cantidad de humedad que se logre liberar depende del grosor del material, por lo que el tiempo en el horno podría ser más que 4 horas. Para comprobar si el material ya está seco se revisa que el aire del horno esté seco y que la superficie del material esté rígida y no elástica. En este caso se retira del horno para enfriar. Una vez a temperatura ambiente el material no desprende olor si está seco.

Se prueba en algunos prototipos el proceso alternativo de secado por prensado en caliente. Para realizar este proceso se comienza igual que en el caso anterior, retirando el material del cultivo e introduciéndolo al horno a 75 °C. Esta vez el material se deja 3 horas en el horno, volteándolo cada hora. Se retira el material del horno y se procede a prensar bajo 500 KPa de presión aproximadamente y a 80 °C. El material se mantiene prensado durante una hora, es necesario supervisararlo para evitar que se sobre caliente. Se retira el material de la prensa y se deja enfriar. En cualquiera de los casos en que el proceso de secado no haya logrado retirar toda la humedad se puede secar el material dejándolo expuesto al sol o volviendo a secarlo en el horno.

El prototipo en este punto está listo. La forma del material resultante debería ser la del molde utilizado durante el cultivo.



Figura 3.5: Carpa de cultivo en a) cultivo con molde, b) cultivo sin molde. Circulado en ambas figuras el termómetro y medidor de humedad.

Parámetros importantes para la producción de MMC

Se resume a continuación las variables de producción que deben ser controladas para obtener resultados consistentes en la producción de MMC. Los valores presentados en la Tabla 3.3 corresponden a los implementados en la metodología experimental.

Tabla 3.3: Resumen de rangos de valores para parámetros de producción que afectan la producción de MMC.

Variables	Proceso unitario	Rango de valores	Unidad
Tamaño de sustrato	Trituración	< 3	[cm]
Humedad contenida en sustrato	Inoculación y mezcla	60 - 80	[% m/m]
Relación inóculo sustrato	Inoculación y mezcla	20 - 35	[% m/m]
Aireación	Cultivo	-	-
Temperatura	Cultivo	25 - 29	[°C]
Humedad relativa	Cultivo	70 - 85	[% HR]
Nivel de cobertura	Cultivo	> 75	[% área]
Humedad contenida	Secado	< 10	[% m/m]

Como explicación breve para cada variable, el tamaño de sustrato corresponde al largo de las ramas luego de ser trituradas. La humedad contenida en el sustrato se mide a través de la diferencia de peso del sustrato seco a la entrada de la esterilización y el húmedo a la salida. La relación inóculo sustrato es específica al sustrato sólido en grano, medido en masa de inóculo sobre masa de sustrato en la mezcla. La aireación hace referencia a la necesidad del micelio de consumir oxígeno para su crecimiento, por lo que el lugar de cultivo necesita de un método de ventilación. El nivel de cobertura hace referencia a una medida cualitativa para definir el termino del periodo de cultivo, donde si la cara visible del molde está cubierta en más de 75 % de su superficie por micelio, el material está listo para ser retirado del molde.

Por último la humedad contenida posterior al secado se mide principalmente por medidas cualitativas de la cantidad de vapor saliendo del horno y de las características del material, como rigidez superficial y una reducción del olor que tenía previo al secado.

3.3. Metodología de evaluación

El proyecto de producción de materiales de micelio para su uso como aislantes en la construcción tiene una gran variedad de aristas que abordar para poder lograr llegar a una implementación exitosa. La evaluación realizada en la presente memoria se divide en dos partes, la evaluación técnica y la evaluación económica. La evaluación técnica se enfoca en definir los procesos unitarios de un caso base y dos alternativas, dimensionar los equipos asociados a cada una y luego comparar los procesos en función de una serie de criterios técnicos. Para orientar el diseño de los procesos se definen bases de diseño, que a su vez están alineadas con las directrices definidas en la Metodología del Marco Lógico (MML) desarrollada en la presente metodología. El objetivo de la MML es dar un marco de planeamiento estratégico, que explicita los objetivos y grandes metas, para así lograr orientar procesos de planificación, diseño y evaluación [81]. La evaluación económica del proyecto estudia los costos de operación e inversión asociados a cada alternativa, y estudia la rentabilidad a través del indicador VAN. El análisis de sensibilidad busca permitir visualizar el efecto de distintos supuestos de mercado sobre el comportamiento económico del proyecto, permitiendo con esto discutir sobre los resultados económicos obtenidos en primer lugar.

3.3.1. Evaluación técnica

La evaluación técnica parte por definir la escala de producción a la cual se diseñará el proceso. Esto se logra mediante una estimación en base a indicadores del mercado de los aislantes en la construcción. Se define como objetivo que la planta pueda producir suficientes MMC como para reemplazar el 1% del consumo de EPS utilizado en construcción en Chile. A partir de esto se definen las bases de diseño, que son los requisitos que los diseños de los procesos deben cumplir. Las bases de diseño de esta memoria cubren el volumen de producción, y las propiedades mínimas que deben tener los material producidos.

Luego se realiza la descripción del proceso a escala industrial. Se presenta un esquema básico de los equipos involucrados y se detalla cual es el modo de operación de cada proceso unitario involucrado. Se presentan después dos alternativas de procesamiento y se describen los procesos unitarios añadidos al proceso base. Las modificaciones al proceso base se orientan a través de la MML para producir las alternativas.

La evaluación técnica continua con el cálculo de flujos másicos que se deben procesar durante la operación. Los flujos resultantes quedan presentados en el balance de masa. A partir de los flujos obtenidos se procede al dimensionamiento de los equipos. Se dividen los equipos en principales y secundarios. Los principales son dimensionados en forma más detallada mientras que los secundarios son dimensionados a través de catálogos de productos. El criterio central del dimensionamiento es que exista la capacidad de procesar los flujos másicos calculados. Del dimensionamiento también se obtienen los precios de los equipos, que luego son utilizados en la evaluación económica para determinar los costos de inversión.

Para terminar, se realiza una evaluación cualitativa de las alternativas presentadas para discutir sobre criterios relevantes de la implementación de las plantas diseñadas. Los criterios son riesgo del negocio, factibilidad de implementación, operatividad, mantenibilidad, riesgos ambientales, y seguridad y salud. Los criterios son divididos en sub-criterios con los que se evalúan las alternativas en una escala de cinco calificaciones. Los resultados de esta evaluación buscan reflejar de forma cuantitativa los resultados obtenidos del desarrollo técnico de las alternativas, pero se ven limitados por el tipo de evaluación realizada, que se basa en la apreciación personal del autor, guiada en todo caso, por los objetivos definidos en la metodología del marco lógico.

En la siguiente sección se describe la metodología del marco lógico (MML) al mismo tiempo que se desarrolla. A través de esta se busca definir un objetivo central para el proyecto de producción e implementación de MMC como aislante térmico en la construcción. La MML contempla dos etapas, de las cuales se desarrollará solo la primera de identificación del problema y alternativas de solución, ya que la segunda etapa está enfocada al proceso de implementación del proyecto a través de un plan operativo práctico para la ejecución, lo que queda fuera del alcance de la memoria.

3.3.2. Metodología del Marco Lógico (MML)

Identificación del problema

Como se ha descrito en la presente memoria, a nivel global el mercado de la construcción requiere de la instalación de materiales aislantes en nuevas y antiguas construcciones para asegurar el confort térmico e higroscópico de sus habitantes y para disminuir el consumo de energía asociado al mantenimiento de las condiciones interiores. La propuesta de los MMC como alternativa a los materiales de aislación más comúnmente usados surge por el impacto negativo que el ciclo de vida de estos últimos tienen sobre el medio ambiente, cuantificado principalmente en emisiones de GEI. Los recursos académicos en torno a los MMC indican su potencial como aislante, siendo sus características más favorables su capacidad de aislación térmica y de sonido, y su resistencia al fuego. Otras alternativas sustentables existen para los aislantes convencionales, que han ganado tracción e interés de investigadores, productores y consumidores por su positiva evaluación ambiental, pero su potencial de desarrollo es limitado y sus características no son del todo competitivas. A raíz de esto surge el interés por desarrollar MMC como aislantes para la construcción, que aún teniendo limitaciones tienen el potencial de mejora a través de investigación en torno a su producción.

Por lo descrito anteriormente el presente proyecto ya supone la elección de los MMC como alternativa a implementar para reemplazar a los materiales aislantes convencionales. El problema que esta situación plantea es que **los MMC en su estado de desarrollo actual no satisfacen los requisitos para ser usados como aislantes en la construcción.**

Análisis de involucrados

En esta etapa el foco está en identificar actores interesados o beneficiados directa o indirectamente de la resolución del problema definido. Es necesario analizar los roles, intereses, poder relativo y capacidad de participación de los actores. También definir la posición de

cooperación o conflicto en la que se encuentren, e incluir en el diseño de la solución estrategias para disolver los conflictos o convencer a los actores que se encuentren indiferentes [81]. Se presenta en la Tabla 3.4 un primer acercamiento a los actores involucrados en la implementación de los MMC como aislantes en la construcción. Un estudio de mercado o una aproximación a estos actores permitirían obtener información más detallada y fidedigna. Así como el resto de la MML desarrollada a continuación, se explicitan estas nociones de forma de hacer más transparente la motivación detrás de ciertas decisiones de diseño o supuestos realizados sobre el mercado de la construcción.

Tabla 3.4: Resumen de actores involucrados en el desarrollo de los MMC como aislante para la construcción.

Actores	Posición	Interés principal
Particulares interesados en renovación o construcción	Indiferente o favorable	Calidad y precio vivienda
Empresas o grupos de construcción	Indiferente o en conflicto	Contratos y producción
Proveedores de productos de construcción	Indiferente o en conflicto	Utilidades y calidad
Proveedores materiales aislantes convencionales	En conflicto	Ventas
Instituciones de construcción	Favorable	Calidad y sustentabilidad
Gobierno y ministerios	Favorable	Calidad y sustentabilidad
Micólogos, productores de hongos	Favorable	Rentabilidad y valorización
Universidades	Favorable	Desarrollo y transferencia

Análisis del problema

El análisis del problema parte por identificar los aspectos de la situación a abordar, y definir a partir de esta el problema principal, usando criterios de prioridad y selectividad. Es necesario revisar también los efectos del problema, los que verifican su validez, y encontrar causas que lo estén provocando. Estos se sintetizan en un árbol de problemas como el que se muestra en la Figura 3.6. Esta es una versión inicial del árbol de problemas, es ideal analizarlo en grupo para iterar sobre este y mejorar su validez e integridad [81].

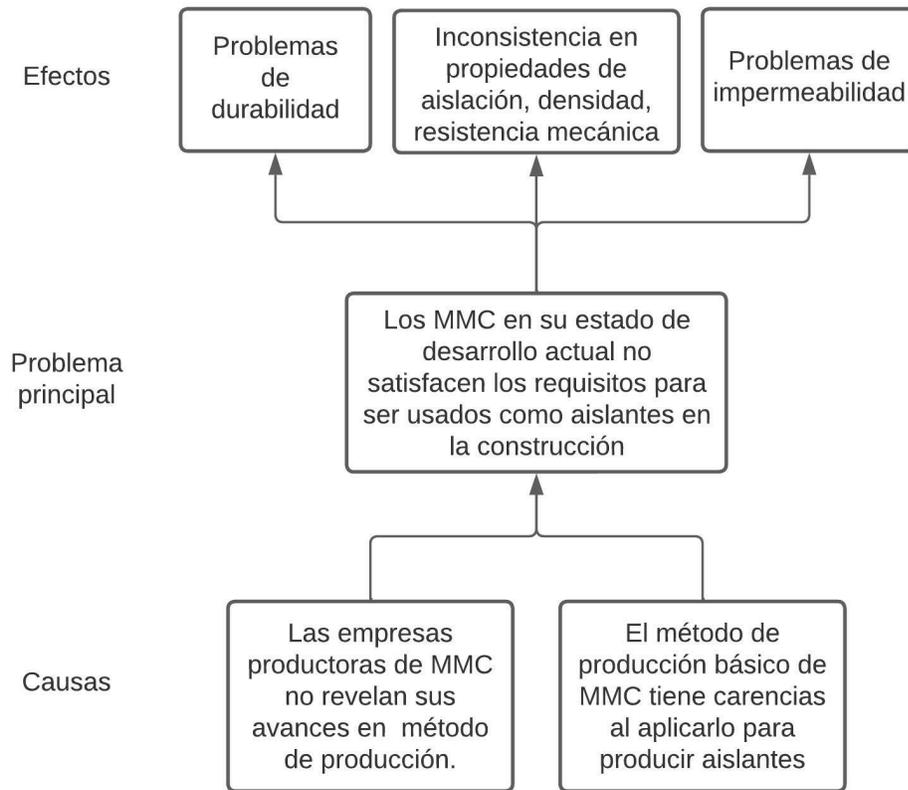


Figura 3.6: Diagrama de árbol de problemas de la MML.

Análisis de objetivos

A partir del análisis anterior se realiza el análisis de objetivos. Este permite describir la situación futura una vez que se haya resuelto el problema principal. Se busca entonces definir los medios y los fines objetivos, que resultan de la expresión de los estados negativos planteados anteriormente en estados positivos. Los medios se pueden ordenar en orden jerárquico como muestra la Figura 3.7. El desarrollo de este árbol es una oportunidad para mejorar el árbol anterior, de hecho se incluye entre los fines el precio, que antes se excluía.

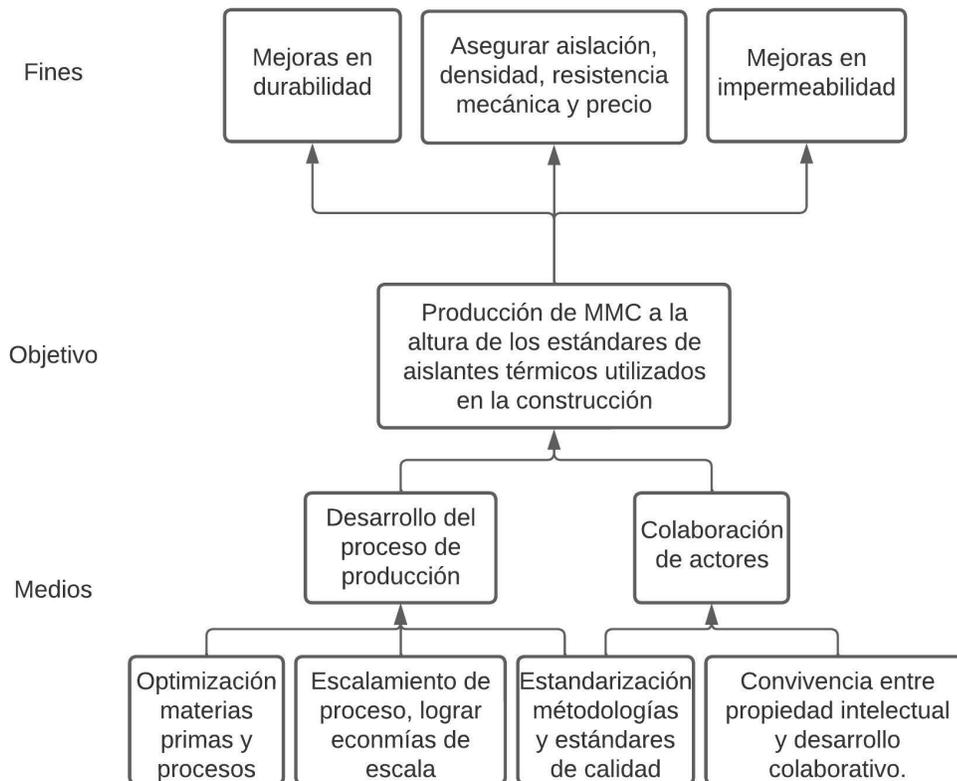


Figura 3.7: Diagrama de árbol de objetivos de la MML.

Identificación de alternativas de solución al problema

La MML propone en esta etapa el supuesto que al conseguir los medios más bajos, planteados en el árbol de objetivos, el problema se soluciona, que según la lógica que se ha empleado es lo mismo que decir que al eliminar las causas más profundas se elimina el problema. A partir de los medios presentados en las raíces del árbol de objetivos en la Figura 3.7 se definen entonces acciones probables que en términos operativos logren conseguir los medios [81]. La lista de acciones propuestas se muestra a continuación.

- Definir parámetros de entrada y salida en la producción de MMC. Experimentar manipulando las variables de entrada y registrando las de salida.
- Diseñar un proceso de producción a escala industrial, discutiendo su validez técnica y económica, e implementarlo a escala piloto.
- Proponer estándares de producción y de medición de propiedades de MMC, específicamente para los utilizados como materiales aislantes en construcción.
- Formar redes de productores e interesados en MMC. Dejar a disposición la mayor cantidad de información posible sobre el trabajo con estos materiales.

Las alternativas a las que hace referencia el título de esta parte de la MML son las distintas formas por las cuales se podrían realizar las actividades recién nombradas. Dado el contexto, la única alternativa posible es la realización de la presente memoria. Se define entonces en

la siguiente sección en que medida las acciones recién nombradas se desarrollan en la memoria, de manera que se mantengan alineadas con los objetivos y los fines definidos para el proyecto. Manteniéndose también dentro de los alcances de la memoria, que corresponde a las limitaciones de la alternativa definida por el contexto actual.

Estructura analítica del proyecto (EAP)

La EAP es un esquema de la alternativa de solución más viable, en este caso la memoria, expresada en sus rasgos más generales. Este esquema en forma de árbol resume la intervención de cuatro niveles jerárquicos, el fin por arriba y debajo el objetivo central del proyecto, luego los componentes, y por último las actividades. Las actividades son acciones concretas que nos acercan a lograr el fin. Como se mencionó anteriormente, las actividades están elegidas en esta oportunidad para ser logradas mediante la presente memoria, pero podrían cambiar en el caso de buscar implementar finalmente el proyecto.

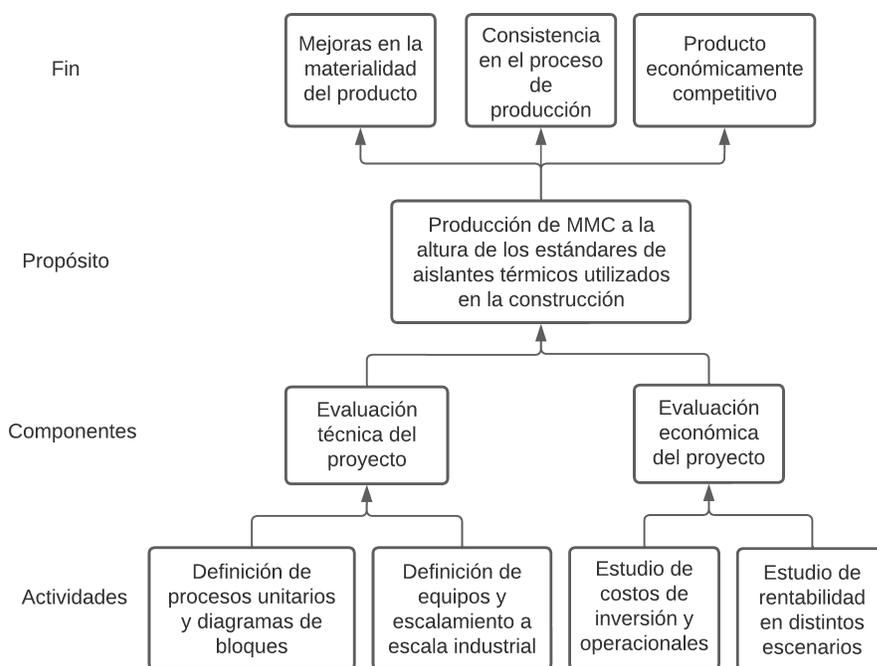


Figura 3.8: Estructura analítica del proyecto

En este caso las actividades definidas corresponden al trabajo desarrollado en la presente memoria. Con esto, se termina de conectar la memoria con los otros árboles presentados por la MML. Así el proceso de evaluación técnica y económica tienen una directriz clara, lo que sirve para entender el contexto de la toma de decisiones e identificar posibles mejoras del trabajo aquí expuesto. En el caso de que se quiera continuar con el proyecto, la metodología del marco lógico sirve como una base para organizar los objetivos y medios por los cuales estos se logren. La MML tiene más que aportar en proyectos, siguiendo esta etapa con la matriz de planificación lógica. La metodología no se desarrolla en su totalidad en este caso al no ser pertinente a la etapa de desarrollo del proyecto.

3.3.3. Evaluación económica

La evaluación económica busca estimar la inversión necesaria, los costos de operación y la rentabilidad del proyecto de implementación de cada alternativa presentada. Se plantea primero el modelo de negocios del proyecto junto con una discusión sobre las condiciones del mercado. Se presenta los resultados de un primer acercamiento al estudio de la demanda del material, donde a través de entrevistas a posibles actores, se determina si existen posibles adoptadores tempranos del uso de los materiales de micelio. Este estudio se realizó fuera del contexto de la memoria, se presentan de forma resumida las conclusiones del estudio.

Luego se procede con el cálculo de los costos de inversión y operación. Para el cálculo de los costos de inversión se parte por el dimensionamiento de todos los equipos involucrados en la alternativa siendo estudiada. Luego, se determina su costo de transporte e instalación aproximado con el índice *chemical engineering plant cost index* (CEPCI). Se determina también la depreciación de los equipos y su precio de venta al final del periodo de evaluación. Los costos de inversión se calculan mediante la metodología CAPEX, que a partir del costo de los equipos estima los costos de inversión directos e indirectos del proyecto.

El cálculo de los costos de operación se realiza a partir de los valores aproximados de los costos asociados a la dotación de trabajadores y a los consumibles y reactivos. La dotación se determina a partir de la descripción del proceso y los consumibles a partir de los balances de masa. Luego se calculan los costos de operación mediante la metodología OPEX, donde en función de los valores recién nombrados se calculan otros valores de costos variables y costos fijos, que en conjunto terminan siendo los costos de operación del proyecto.

El estudio de rentabilidad del proyecto se realiza a través del indicador VAN. El VAN incluye los valores de CAPEX y OPEX determinados anteriormente, con los cuales se realiza un flujo de caja a lo largo de un periodo de evaluación de diez años. El VAN actualiza el flujo de caja de cada año a valor actual y finalmente determina si en conjunto los diez años de proyecto tienen una rentabilidad suficiente para considerarse una buena o mala inversión. El criterio que define el nivel de exigencia sobre la rentabilidad del proyecto es la tasa de retorno. Esta es un porcentaje que define cual es la rentabilidad mínima esperada para el proyecto, que en esta caso se definió en 20 %. Sumada a la tasa de retorno se aplica una prima de riesgo que aumenta la exigencia sobre la rentabilidad del proyecto, esto se hace para reflejar la incertidumbre que existe en torno al proyecto al ser un proceso completamente nuevo, y al encontrarse en una etapa de desarrollo tan temprana. La rentabilidad se estudia luego en dos distintos escenarios en un análisis de sensibilidad.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1. Etapa experimental

La etapa experimental tiene por objetivo la comprobación empírica de la capacidad de producir aislantes térmicos hechos de materiales de micelio. La posterior evaluación técnica en esta memoria se basa en aspectos obtenidos de esta sección. Por ejemplo, ciertas proporciones de los balances de masas son calculados a partir de las proporciones experimentales, además el cumplimiento de las bases de diseño se respalda en parte por los resultados experimentales, que evidencian la relación del proceso con las características finales del material. La medición de las características del material producido queda fuera del alcance de la memoria, pero resulta necesaria para continuar con el desarrollo del proyecto. A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de producción de prototipos.

4.1.1. Prototipos generados

Se produjeron doce distintas versiones de prototipos con el fin de evaluar el proceso de producción que será ocupado como referencia para el escalamiento a escala industrial. Se variaron las materias primas (sustratos), los aditivos y las formas de secado, obteniendo las combinaciones mostradas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Leyenda de nomenclatura para los prototipos producidos.

Posición	Variable	Nomenclatura
1°	Sustrato	Poda de viña (V), Tallos de haba (T), Cartón de huevo (C)
2°	Secado	Horno (h), Prensado (p)
3°	Aditivo	Yute (y1, y2), Vidrio (g)

Tabla 4.2: Versiones de prototipos producidos

Sustrato	Secado	Aditivo	Nombre
Poda de viña	Horno	-	Vh
		Vidrio	Vhg
		Yute	Vhy1
		Yute	Vhy2
	Prensado	-	Vp
Tallos de haba	Horno	-	Th
		Vidrio	Thg
		Yute	Thy1
		Yute	Thy2
	Prensado	-	Tp
Cartón de huevo	Horno	-	Ch
	Prensado	-	Cp

La selección de los aditivos fue impulsada principalmente por distintas publicaciones científicas que mencionaron su uso asociado a mejoras en las propiedades del material. En el caso del vidrio, al utilizarlo en MMC se reportaron mejoras en sus propiedades de resistencia al fuego e integridad estructural [76]. Para el yute Jiang *et al.* determinaron que utilizar envolturas para los MMC se traducían en mejoras mecánicas de los materiales producidos, siendo el yute una de las fibras utilizadas con mejores resultados en cuanto a unión entre la capa externa y el MMC [77].

El proceso de producción de prototipos se realizó con éxito en diez de los doce casos, considerando como éxito los casos en los que el micelio adhirió el sustrato, tomando la forma del molde. Los materiales producidos tienen aspectos similares a los presentados en la literatura revisada y sus densidades y propiedades mecánicas (evaluadas de forma cualitativa) calzan con los datos reportados de los mismos. En la Figura 4.1 se muestran los prototipos obtenidos, su geometría puede ser descrita como un tronco de pirámide cuadrada, con caras cuadradas de 11,5 [cm²] y 10,5 [cm²], y una altura de 6 [cm].



Figura 4.1: Prototipos de MMC producidos.

Los prototipos Ch y Cp no fueron completados de forma exitosa al no haber sido coloni-

zados por el micelio. En primera instancia este resultado podría ser atribuido al sustrato, ya que ambos fueron hechos con cartón de huevo, pero existe bibliografía que indica que este sustrato es muy favorable para la fabricación de MMC [19], por lo que se consideran otras razones. En la Figura 4.2 se muestran los prototipos fallidos, ambos casos tuvieron un comportamiento similar, en donde solo la capa exterior superior de la mezcla fue cubierta por una capa delgada de micelio, como se ve en a). En b) se logra apreciar tres componentes distintos en la mezcla, el micelio blanco, los granos pertenecientes al inóculo y el cartón húmedo. El micelio no logró colonizar el cartón y tampoco los granos, y al momento de desmoldar la mezcla perdió la forma del molde dada la falta de integridad.

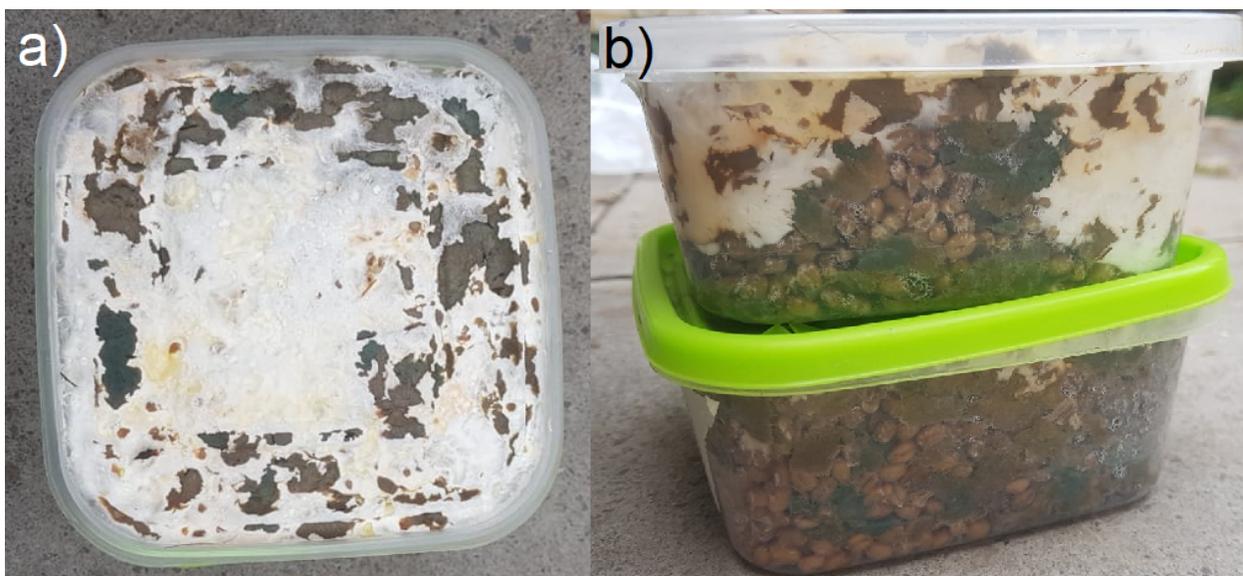


Figura 4.2: a) Vista superior y b) vista lateral de los prototipos fallidos, hechos con sustrato de cartón de huevo.

Una explicación posible de la falla de estos prototipos es que a diferencia del experimento hecho por N. Fernandez en [19], no se ocupó almidón de maíz como aditivo para este sustrato. El almidón es un polisacárido que puede servir como nutriente para el hongo, por lo que en su ausencia puede que el cartón de huevo no sea lo suficientemente nutritivo como para sostener el desarrollo del micelio. Otra explicación está asociada a un problema que surgió durante el proceso de mezcla e inoculación de estos prototipos. Sucedió que la cantidad de agua en el cartón era excesiva, lo que fue notado luego de un día de cultivo. En este punto se decidió eliminar el exceso de agua invirtiendo y apretando los moldes. Es posible que junto con el agua se haya eliminado gran parte de las células de micelio y sus enzimas secretadas, debilitando de forma importante el micelio restante en el molde. Esta explicación es consistente con el hecho que no solo el cartón no está colonizado, si no que también los granos de cereal, que por si solos si son capaces de sostener el crecimiento del micelio.

4.1.2. Registro de producción y aspectos relevantes

La Tabla 4.3 muestra los datos registrados durante la etapa de inoculación y mezcla bajo el título producción, y la etapa final posterior al secado bajo el título producto. La cantidad de sustrato húmedo utilizado para cada molde fue definida en función del volumen necesario para llenar el molde, mientras que la cantidad de grano de inóculo fue definida como un déci-

mo del volumen de sustrato, de forma aproximada. Esta proporción se define tanto en [62] y [63] en función del volumen, pero resulta poco práctico a la hora de medir los componentes de la mezcla y también al escalar el proceso, por lo que se registró la masa de inóculo utilizada con el fin de establecer una regla.

Una primera observación respecto a los prototipos es la cantidad de inóculo utilizada, al comparar los promedios de sustrato húmedo e inóculo de micelio en una fracción, la proporción resulta ser 2,86 veces la masa del sustrato sobre la del inóculo. Esta variable tiene incidencia en el tiempo de cultivo, la velocidad de generación de biomasa de micelio y la cantidad de biomasa final [3], [15], [25]. Dado que los tiempos de cultivo de los prototipos fueron de 15 días, y la biomasa final fue la suficiente para otorgarle a los materiales integridad dimensional, se define que esta relación de mezcla (masa de inóculo igual a 0,35 veces la masa de sustrato húmedo) es adecuada para la producción de MMC a esta escala, en específico para estos sustratos y método de inoculación.

Tabla 4.3: Registro de masas y densidades medidas a través de la metodología experimental.

Etapa	Nombre	Vh	Vp	Vhg	Vhy1	Vhy2	Th	Tp	Thg	Thy1	Thy2	Ch	Cp	Promedio
Producción	Masa sustrato húmedo [g]	327	334	301	278	343	316	357	390	339	330	622	636	331,50
	Masa grano micelio [g]	107	108	121	124	121	109	100	120	129	119	120	120	
	Masa aditivo [g]	-	-	207	9	8	-	-	135	10	6	-	-	63,17
	Peso mezcla húmeda [g]	434	442	629	411	476	425	457	645	478	455	742	756	485,20
Producto	Masa húmeda [g]	343	363	429	265	356	312	337	425	345	369	-	-	354,40
	Masa seca [g]	125	133	242	107	124	89	97	175	105	102	-	-	129,90
	Densidad seca [g/cm ³]	0,17	0,18	0,33	0,14	0,17	0,12	0,13	0,24	0,14	0,14	-	-	0,18

La aplicación de los aditivos es otra variable que fue manejada en la producción de prototipos. Los prototipos Vhg y Thg muestran la capacidad de incorporar vidrio a la mezcla de los MMC sin disminuir la viabilidad del crecimiento del micelio, esto se concluye ya que en ambos casos los tiempos de cultivo y niveles de cobertura final no mostraron mayores cambios respecto al resto de los prototipos. La proporción de vidrio utilizada respecto a la masa de sustrato húmedo es diferente en ambos casos (masa de vidrio igual al 0,69 la masa de sustrato húmedo en Vhg y 0,36 veces en Thg), esto fue probado para evidenciar la tolerancia del micelio a crecer junto con polvo y pequeñas esquiras de vidrio. Bhat *et al.* plantean que los compuestos en el vidrio (C, O, Mg, S, K, Ca) pueden ser utilizados por el micelio como alimento y la incorporación de sílice (SiO₂) en el material mejora su resistencia al fuego [76].

Para el yute, la relación de masa de aditivo respecto al sustrato es bastante pequeña, aproximadamente 0,03 para Vhy1 y Thy1, y 0,02 para Vhy2 y Thy2. Los prototipos y1 y los y2 se diferencian en los métodos de aplicación del yute en el prototipo. Los y1 fueron colocados como muestra la forma A en la Figura 4.3, mientras que los y2 fueron aplicados como muestra la forma B de la misma figura. En los y1 se observó una capa externa de micelio puro (sin sustrato entremedio de la biomasa) la cual ha sido relacionada con mejoras

en impermeabilidad del material [3], [15]. Walczyk *et al.* probaron el efecto del recubrimiento de MMC con capas externas de aditivos (entre ellos el yute) sobre las propiedades mecánicas del material, presentado leves mejoras en resistencia a la torsión y rigidez al aplicar los aditivos [77].

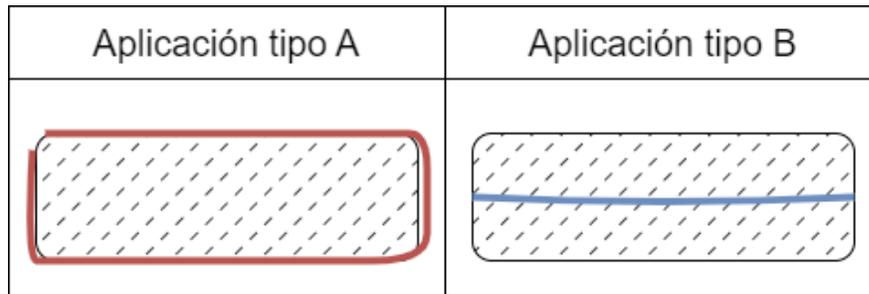


Figura 4.3: Métodos de aplicación de yute como aditivo en prototipos. Vista lateral de la mezcla dentro del molde representada por el achurado, las líneas de color la forma de aplicación del yute.

Se probó también la variación del proceso de secado de los MMC, usando prensado en caliente. El proceso de prensado consiste en presionar los materiales entre dos placas calientes. Las condiciones de operación reportadas en literatura que se buscaban emular (80°C y 500 [KPa]) no se pudieron replicar del todo experimentalmente, al no contar con los equipos adecuados. El proceso se llevó a cabo con una prensa de cocina como la que se observa en la Figura 4.4. La temperatura no se mantuvo en un valor constante ya que al encenderse la prensa se calienta hasta los 190°C, lo que hizo necesario estar midiendo la temperatura constantemente y apagar y encender el equipo para mantener la temperatura lo más cercana al valor de operación deseado de 80°C. En cuanto a la presión se logró aplicar una fracción del valor deseado, usando pesos como se ve en la Figura 4.4, la presión máxima durante la operación fue de 20 [KPa]. Esto se logró utilizando 28 [kg] de peso sobre la prensa. Para obtener la presión deseada tendría que haberse aplicado un peso de 650 [kg], lo que no era viable en esta configuración. Los materiales después del prensado perdieron 3 [g] de masa cada uno y no presentaron cambios dimensionales, la superficie sufrió un cambio de color como se aprecia en la Figura 4.5.



Figura 4.4: Configuración proceso de prensado.



Figura 4.5: Aspecto de los materiales antes y después del prensado, izquierda y derecha respectivamente.

Los cambios generados por el proceso de prensado no fueron los esperados, al no haber cambios en las dimensiones del material y una baja variación en sus masas. Esto significa que la densidad de los materiales prensados no cambió significativamente a raíz del proceso. De cualquier forma, el proceso de prensado no es recomendable para la producción de aislantes ya que se espera que los materiales prensados disminuyan su resistencia térmica al perder los espacios de aire de su interior que sirven como aislantes. Este proceso podría ser de utilidad para aplicaciones que requieran mayores resistencias mecánicas al haberse reportado mejoras en estos aspectos en el material bibliográfico [3], [23], [25].

Otros aspectos relevantes presentados en la Tabla 4.3, es que durante el cultivo la masa total contenida en la mezcla disminuye. Al comparar el peso mezcla húmeda en producción y la masa húmeda del producto se puede calcular que en promedio se perdió el 27 % de la masa de la mezcla húmeda durante el cultivo. Se le atribuye esta diferencia al fenómeno de transferencia del agua desde la mezcla al aire en forma de vapor, esto es esperable debido al alto gradiente generado por la humedad contenida en el sustrato prácticamente saturado en agua al principio del cultivo. A pesar de esta transferencia la masa húmeda del producto aún tiene un alto contenido de agua, lo que se evidencia en la diferencia entre este último parámetro con la masa seca. En promedio los materiales perdieron un 64 % de su masa durante el secado, siendo más baja esta proporción para los prototipos con vidrio (51 % en promedio entre estos).

Por último, la única propiedad física medida de los prototipos producidos fue la densidad, con un rango entre 123 y 184 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ y un promedio de 150 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ para los MMC sin vidrio como aditivo. Otra propiedad física que es fundamental para la competitividad del material como aislante es la conductividad térmica. Como se ve en el gráfico de la Figura 4.6, confeccionado por Jones *et al.*, los aislantes comerciales están sujetos a exigencias en esta última propiedad, definiendo que bajo los 0,05 $[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ los MMC son competitivos entre aislantes comerciales. Para la evaluación del proyecto se considera el supuesto que los MMC producidos cumplen este criterio, y se define el valor de la conductividad térmica para los cálculos en 0,045 $[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$, al ser un valor cercano al obtenido por Elsacker *et al.*, que ocupó una metodología de producción similar a la de esta memoria.

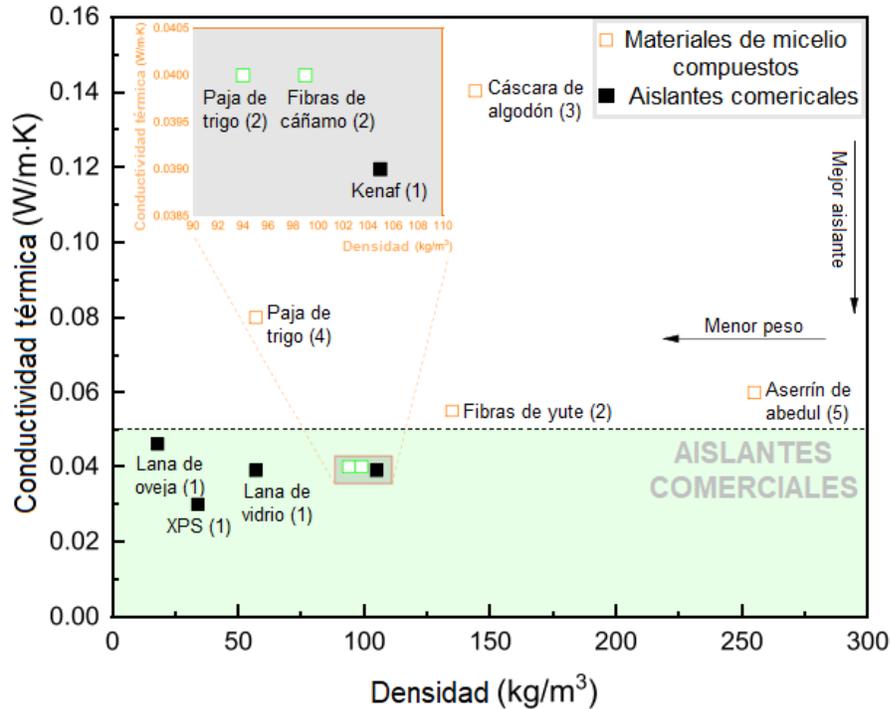


Figura 4.6: Gráfico de densidades y resistencias térmicas de distintos MMC y aislantes comerciales. *Nota.* Gráfico traducido de [11]. Data de (1) Schiavoni *et al.* [39], (2) Elsacker *et al.* [25], (3) Holt *et al.* [24], (4) Papadopoulos [26], (5) Yang *et al.* [28].

4.1.3. Evaluación de prototipos

El propósito de la producción de prototipos es fundamentar con evidencia empírica el escalamiento de la producción de MMC. A través de la evaluación cualitativa de los prototipos, se determina que el proceso experimental empleado es una referencia realista del proceso de producción de MMC para uso aislante. La cuantificación de propiedades como la conductividad térmica y la permeabilidad quedan fuera del alcance de esta memoria. El cumplimiento de las normativas y exigencia que actúan sobre estas propiedades no está asegurado, lo que hace al proyecto más riesgoso. El supuesto de que el material es competitivo en el mercado es débil al no estar comprobado, y de no cumplirse, la viabilidad del proyecto pasa a ser cercana a cero. Se proponen para robustecer este supuesto, experimentos y mediciones para desarrollar a futuro.

Un aspecto que afecta la viabilidad el proyecto son los tiempos de cultivo necesarios para producir MMC, la medición de la biomasa de micelio entrante en el inóculo y de salida en el material es crucial para poder estudiar las cinéticas de crecimiento para su eventual optimización. La permeabilidad y durabilidad del material deben ser determinadas para poder ofrecer el material como producto. Esta es una de las principales barreras para el material dada su composición orgánica, se espera preliminarmente que este se descomponga y pierda su capacidad aislante con el tiempo. Aun así el material ha mostrado capacidad de resistir en condiciones de operación [61]. Por lo que para superar esta barrera es necesario definir metodologías de evaluación estandarizadas para el material y exigencias que aseguren el uso

seguro de los MMC en viviendas y otras construcciones.

El material ha mostrado en investigaciones propiedades de aislación e higroscópicas suficientes, en principio, para justificar su uso como aislante. Para mejorar la viabilidad de su implementación aún es necesario el mejoramiento de sus propiedades. Se observa potencial en el uso de aditivos como método de mejora. Puede ser de interés a futuro técnicas que generen capas externas más resistentes en el material. Herramientas biotecnológicas como ingeniería genética, o químicas como post-procesamientos por inmersión, podrían servir para lograr un material más duradero o con mejores propiedades de aislación. El estudio del uso de los MMC junto con diferentes materiales y técnicas de construcción también tiene potencial como vía de desarrollo del producto.

El manejo del sustrato ha mostrado repetidas veces tener una alta incidencia sobre el material producido [3], [15], [25]. Por esto podría ser interesante buscar una combinación óptima de sustratos para la fabricación de MMC para uso como aislante. En caso de conducir tal investigación es de suma importancia considerar que uno de los ejes fundamentales de la producción de MMC es la valorización de residuos, lo que condiciona la elección de sustratos. La poda de viña y los tallos de habas son residuos propios de la producción agrónoma chilena, y aun así su suministro como materia prima no está asegurada en el eventual caso de escalar la producción a escala industrial. El uso de sustratos entonces tiene que estar sujeto a la disponibilidad de las materias primas en el entorno, lo que puede tener una variación por localidad y estacional que es necesaria considerar a la hora de plantear el proyecto.

4.2. Evaluación técnica

La evaluación técnica y económica a continuación se basa en una serie de supuestos que conforman los criterios de diseño del proyecto. La mayoría se explicita y se discute a lo largo de la presentación de los resultados. Se nombran a continuación algunos que son supuestos centrales del proyecto.

Tabla 4.4: Supuestos base para la evaluación del proyecto.

Supuesto	Valor	Justificación
Precio del dólar	\$873,02 [CLP/USD]	Promedio de precio de cambio del dólar reportado por SII entre enero y noviembre del 2022.
Precio del EPS	\$51.100 [CLP/m ³] o \$58,5 [USD/m ³]	Precio promedio de material aislante de EPS presentado en el manual ONDAC de cotizaciones para construcción [70].
Densidad del EPS	21,65 [kg/m ³]	Densidad productos de construcción de EPS destinados a aplicaciones en muros y techos [68], [69].
Conductividad térmica MMC	0,045 [W/m·K]	Valor reportado por Elsacker <i>et al.</i> [15]. Proceso de producción similar al del material producido experimentalmente.
Densidad MMC	180 [kg/m ³]	Valor promedio de las densidades de los prototipos producidos.

4.2.1. Escala de producción

Para partir la evaluación técnica se define la escala de producción. Se pasa desde la producción de prototipos en la etapa experimental, al diseño de una planta hipotética de materiales de micelio, situada en Chile. Se define la escala de producción como el 1% del volumen de

EPS consumido actualmente en la construcción en Chile. Se determina el volumen a producir entonces mediante a una estimación de este volumen. Se discute a continuación los supuestos utilizados para su cálculo. Los datos utilizados se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Valores de mercado del EPS.

Dato	Valor	Unidad	Fuente
Masa EPS consumida a nivel mundial	10.066	[kt/año]	[71]
Fracción de EPS destinada a la construcción	46	%	[71]
Fracción de EPS consumido por América del Sur	7	%	[71]

Con estos valores es directo calcular la masa de EPS consumida en el rubro de la construcción a nivel mundial, y la masa de EPS consumido en América del Sur. Para calcular la masa de EPS utilizado en América del Sur, en construcción, se utiliza el supuesto de que la proporción mundial de uso de EPS en construcción se mantiene también en América del Sur. Con esto se obtiene que la masa de EPS utilizada en construcción, en América del Sur, es de 324,23 [kt].

Para calcular la masa de EPS consumida específicamente en Chile, se ocupa el siguiente supuesto. La masa de EPS consumida por cada país en América del Sur es proporcional a la relación que existe entre su PIB y el del total de países en este continente. Este supuesto ignora el hecho que los tamaños de los mercados de construcción en cada país, o que el consumo de EPS en cada país, no necesariamente mantienen una proporcionalidad con la relación que estos países tienen entre sus PIBs. Por lo tanto el supuesto es una simplificación que aumenta el error del resultado, pero resulta práctico al permitir estimar el tamaño del mercado del EPS utilizado en construcción, en Chile. A continuación se muestran los valores utilizados en la Tabla 4.6 y los resultados calculados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.6: Valores de mercado del EPS.

Dato	Valor	Unidad	Fuente
PIB nominal América del Sur (2018)	480.965	Millones de [\$USD]	[72]
PIB nominal Chile (2018)	6.808.660	Millones de [\$USD]	[72]

Tabla 4.7: Valores estimados, y escala de producción.

Dato	Valor	Unidad
Masa de EPS, segmento construcción en Chile	22,89	[kt/año]
Masa de EPS a sustituir (1 % del segmento)	228,96	[ton/año]
Escala de producción materiales de micelio	10.575,64	[m ³ /año]

La escala de producción corresponde al volumen de materiales de micelio que la planta a diseñar tiene que producir. Esta se define igual al 1 % del volumen de EPS empleado en construcción en Chile. La transformación de masa a volumen utilizada para calcular este valor se basa en el supuesto de la densidad de EPS presentado en la Tabla 4.4.

4.2.2. Bases de diseño

Con la escala de producción definida, se determinan las bases de diseño. Estas son los puntos claves por los cuales el diseño de la planta de producción se rige. El diseño busca garantizar el cumplimiento de las bases. Estas se muestran a continuación.

Bases de diseño:

- Producción de 10.575 [m³/año]
- Material con densidad entre 80 y 200 [kg/m³].
- Material con conductividad térmica entre 0,04 y 1,1 [K·m²/W].

Estas bases de diseño cubren dos aspectos del proyecto, el volumen de producción, asociado a la demanda, y las propiedades del material, asociada a la capacidad de competir como material aislante en la construcción. Se podrían plantear las bases de forma más precisa o más exigente. Por ejemplo, el volumen de producción se podría abordar de manera más precisa a través de un estudio de demanda del producto. Se podría también ser más exigente con las propiedades del material, al exigir que la producción cumpla todas las normativas de materiales aislantes de uso residencial. Realizar estos cambios en las bases logra un diseño más ajustado a condiciones reales. Las bases fueron definidas de manera de mantener el diseño dentro del alcance de la memoria, profundizar en temas de producción y de mercado permiten bases de diseño más completas.

Existen aspectos adicionales considerados en el diseño del proceso, como la escalabilidad de procesos y la energía utilizada en producción, que se excluyen de las bases de diseño. No es práctico fijar estos aspectos en las bases ya que sirven como indicadores del proceso diseñado. Un análisis en detalle de estos indicadores queda excluido del alcance de esta memoria, pero es de interés desarrollarlos para comprobar las ventajas o problemas asociados a la producción del material.

4.2.3. Descripción del proceso

Para comenzar con el diseño es necesario definir la forma en la que se realizará la producción. El diseño del proceso se basa en diagrama de bloques utilizado para la producción en la etapa experimental, presentado a continuación en la Figura 4.7. El diseño del proceso de producción entonces resulta de la interpretación de estos procesos unitarios a escala industrial. Se define para este propósito una empresa hipotética, que actúa como ente regulador del proceso.

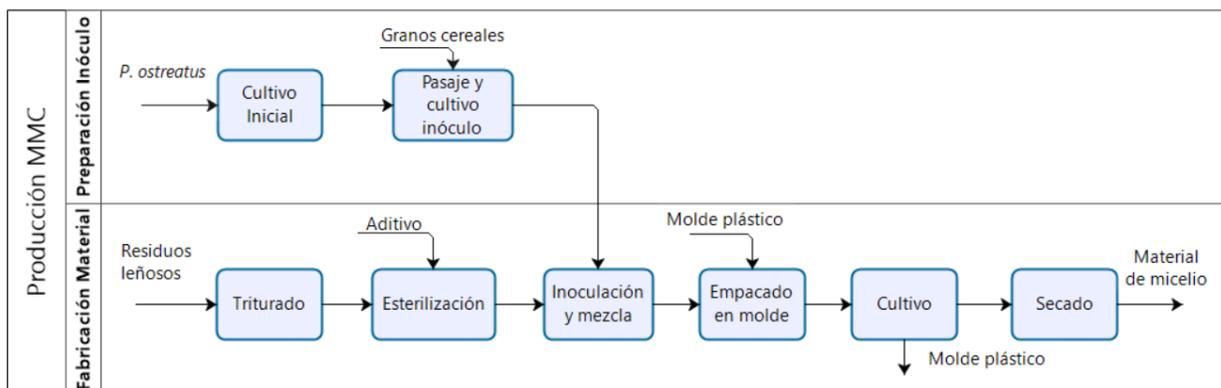


Figura 4.7: Diagrama de bloques proceso base.

Se presenta en la Figura 4.8 el diagrama de flujos correspondiente al proceso base. Se le nombra proceso base para diferenciarlo de las dos alternativas que surgen más adelante de la modificación de este. En el diagrama de flujos cada letra corresponde a un proceso unitario y cada número a los flujos entre estos. Se resume preliminarmente los equipos y flujos involucrados en la Tabla 4.8, y luego se describe el modo de operación.

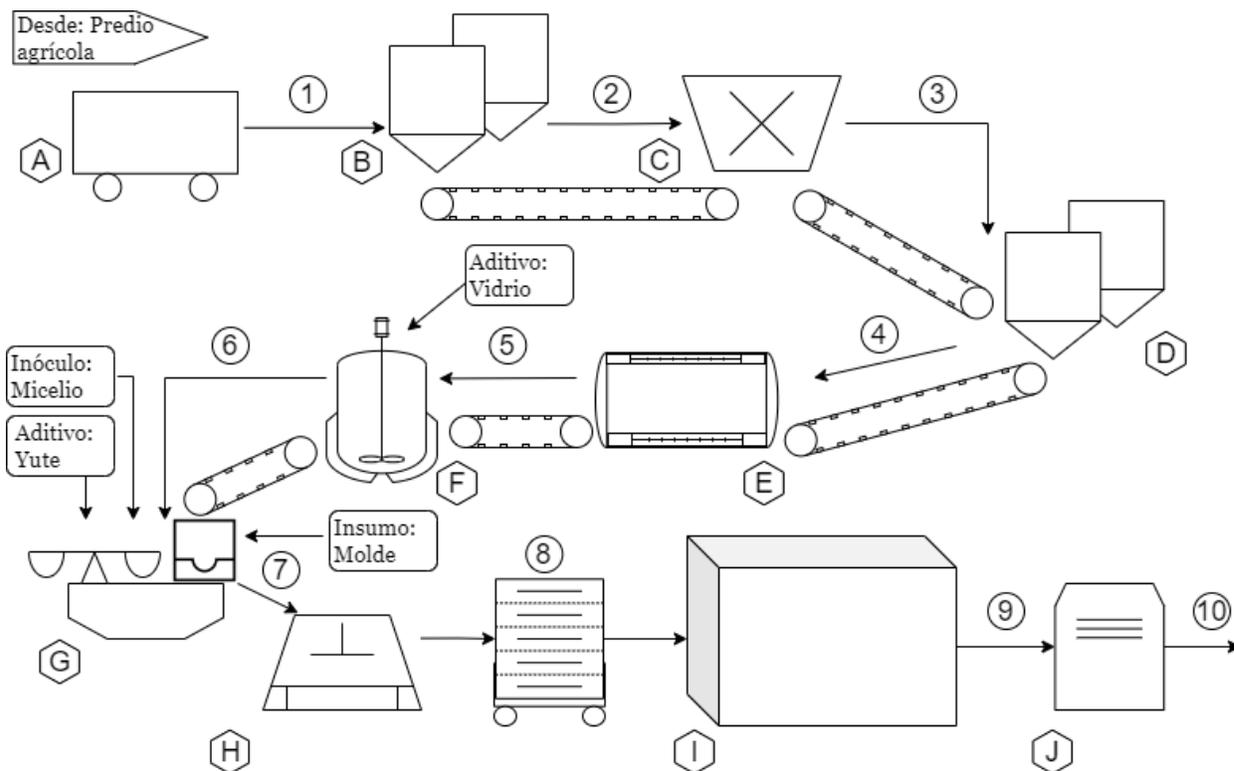


Figura 4.8: Diagrama de flujo del proceso base de producción de materiales aislantes de micelio.

Tabla 4.8: Equipos y flujos del proceso base a escala industrial.

Código	Equipo principal	Proceso	Código	Contenido	Flujo [kg/día]
A	Camión	Transporte	1	Residuo leñoso	10.432,0
B	Tolva	Recepción	2	Residuo leñoso	10.432,0
C	Triturador de ramas	Triturado	3	Madera triturada	10.432,0
D	Tolva	Alimentación	4	Madera triturada	10.432,0
E	Túnel esterilizador	Esterilización	5	Madera húmeda	14.604,9
F	Estanque agitado con chaqueta	Mezclado	6	Madera húmeda con vidrio molido	19.716,6
G	Mesa de inoculación	Inoculación	7	Sustrato inoculado	25.225,9
H	Prensa	Empacado en molde	8	Sustrato inoculado	25.225,9
I	Sala de cultivo	Cultivo	9	Material de micelio húmedo	19.986,7
J	Cámara de secado	Secado	10	Material de micelio seco	7.325,8

En la descripción presentada a continuación cada proceso se resume en un a tabla que considera cuatro factores. Estos son régimen de operación, condiciones de operación, equipos involucrados y personal requerido. En régimen de operación se definen dos aspectos, primero el régimen, ya sea tipo batch, semi-batch o continuo, y segundo la frecuencia de operación, pudiendo ser diaria o periódica (la frecuencia del periodo es variable). Las condiciones de operación hacen referencia a el ambiente en donde se lleva a cabo el proceso, la planta cuenta con tres espacios distintos, exterior, planta y planta limpia, siendo estos ascendentemente

más rigurosos en la limpieza y control de factores de contaminación. La planta opera en un régimen de 12 horas al día, 5 días a la semana, 52 semanas al año.

Línea principal

A: Transporte

El transporte de la materia prima, en el común de las plantas de producción, suele abordarse como parte de la cadena de suministros que existe en torno a la compra de esta. Para los MMC, la materia prima es un residuo orgánico que no está asociado a una cadena de suministro. Por esto es necesario que parte de las actividades de la empresa estén orientadas a definir una red de suministro y a gestionar su ejecución. La materia prima utilizada afecta directamente a las propiedades finales del material, por lo que su obtención es clave para lograr mantener consistencia en la producción.

Este proceso empieza entonces con la coordinación de la recolección de poda de vid y tallos de habas (con la posibilidad de incluir otros sustratos). La empresa debe comunicarse con los predios para saber la disponibilidad de estos residuos. El trabajo de recolección consiste en enviar un camión para la recolección del material en el predio, y luego transportarlo de vuelta a la planta. Este proceso requiere personal capacitado con herramientas simples.

Tabla 4.9: Tabla resumen proceso de transporte.

Régimen de operación	Periódico
Condiciones de operación	En terreno y ruta
Equipos involucrados	Camión
Personal requerido	Coordinación, recolección

B: Recepción

El proceso de recepción es el manejo del material leñoso una vez llega a la planta. Este material llega en camiones y es necesario determinar donde y para qué propósito se descarga. La primera opción es procesar la materia prima inmediatamente, para lo cual el personal descarga el material en una tolva que alimenta el siguiente proceso de trituración. Segunda opción es almacenar la materia prima, para esto se descarga en un galpón acondicionado para este propósito. El manejo del almacenamiento es clave para prever bajas estacionales de materias primas.

Tabla 4.10: Tabla resumen proceso de recepción

Régimen de operación	Batch o semi-batch, periódico
Condiciones de operación	Exterior
Equipos involucrados	Camión, tolva, almacén
Personal requerido	Administración almacén, descarga

C: Triturado

En este proceso la materia prima es alimentada a una trituradora de madera para reducir su tamaño. La madera triturada resultante es una mezcla de fibras, trozos de largo menor a 3 [cm] y polvo. La máquina trabaja de manera continua, su salida puede ser almacenada por lo que se puede triturar en exceso de manera de aumentar las reservas de madera triturada y no tener que operar la máquina constantemente. La operación de la máquina es simple, se le debe hacer mantenimiento para evitar averías que detengan la producción.

Tabla 4.11: Tabla resumen proceso de trituración.

Régimen de operación	Continuo, periódico
Condiciones de operación	Exterior o planta
Equipos involucrados	Trituradora de madera
Personal requerido	Operación, mantenimiento

D: Alimentación

Este proceso consiste en el almacenamiento de la madera procesada, con el fin de controlar el flujo de entrada a la parte limpia del proceso (*i.e.* entre esterilización y cultivo). Se llenan tolvas con el flujo proveniente de trituración, estas luego liberan su contenido de forma controlada a una cinta transportadora que se dirige a esterilización. El personal en esta etapa debe decidir el llenado y vaciado de las tolvas, además de manejar la información sobre sus contenidos.

Tabla 4.12: Tabla resumen proceso de alimentación.

Régimen de operación	Semi-batch o batch, diario
Condiciones de operación	Planta
Equipos involucrados	Tolva
Personal requerido	Administración almacén.

E: Esterilización

En este proceso se busca eliminar las fuentes de contaminación que lleva la materia prima. Para esto, el flujo de madera triturada proveniente de alimentación es procesado de forma continua por un túnel esterilizador. En este equipo el material es rociado con agua caliente hasta alcanzar una temperatura de 80°C por a lo menos 20 minutos, con esto se espera que los microorganismos causantes de contaminación en el proceso de cultivo sean eliminados en su mayoría. El material en este proceso se hidrata con el agua de esterilización, el agua que no es absorbida es recirculada por el mismo equipo.

Tabla 4.13: Tabla resumen proceso de esterilización

Régimen de operación	Continuo, diario
Condiciones de operación	Planta limpia
Equipos involucrados	Túnel esterilizador
Personal requerido	Operación, mantención

F: Mezclado

En el mezclado se busca preparar la madera triturada para ser utilizada como sustrato en el cultivo de micelio. En primera instancia solo se requiere que el sustrato baje de los 30 °C para pasar al proceso de inoculación. Por esto se ocupa un estanque con chaqueta fría. Además en esta etapa se pueden incorporar aditivos como el vidrio molido, el cual tiene que quedar mezclado con el sustrato, por esto el estanque debe contar con un sistema de agitación. Se pueden agregar en esta etapa aditivos líquidos o en polvo para favorecer el crecimiento del micelio, aun que por ahora no se estima como una opción.

Tabla 4.14: Tabla resumen proceso de mezclado

Régimen de operación	Semi-batch, diario
Condiciones de operación	Planta limpia
Equipos involucrados	Estanque agitado con chaqueta
Personal requerido	Operación

G: Inoculación

En este proceso el sustrato preparado se mezcla con el inóculo de micelio. Para esto la mezcla se coloca en el molde plástico que le dará la forma al material resultante, en este caso son planchas rectangulares de 0,5 [m] de ancho y 1 [m] de largo, con un grosor de 5 [cm]. El yute se aplica en este paso, se propone la aplicación tipo C, presentada en la Figura 4.9, que es la combinación de los dos métodos aplicados experimentalmente (tipo A y tipo B) . Este proceso entonces es realizado por un operador, encargado de medir el sustrato añadido, el inóculo añadido, manteniendo una proporción, y aplicar el yute entre la mezcla y al rededor de ella.

Tabla 4.15: Tabla resumen proceso de inoculación

Régimen de operación	Semi-batch, diario
Condiciones de operación	Planta limpia
Equipos involucrados	Mesa de trabajo
Personal requerido	Operación

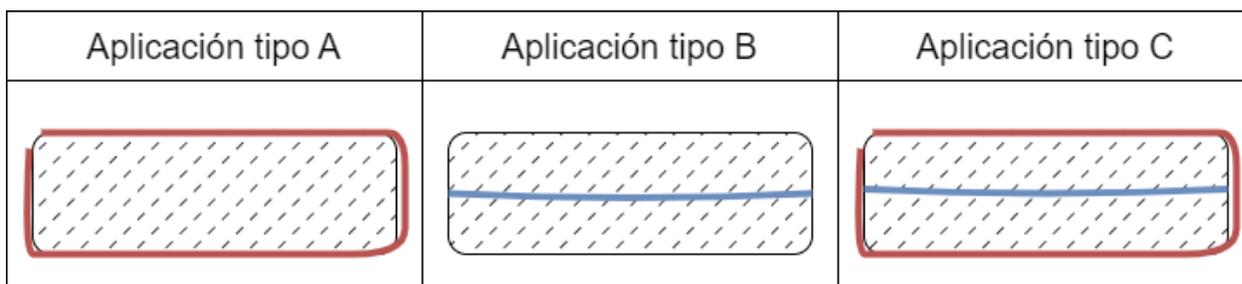


Figura 4.9: Formas propuestas de aplicación del aditivo arpillera de yute (líneas rojas y azules). Vista lateral del sustrato inoculado (achurado negro).

H: Prensado

En este proceso el sustrato inoculado es presionado dentro del molde para eliminar espacios vacíos dentro de la mezcla. Este proceso también afecta el grosor final del material, por lo que debe estar estandarizado el grosor final de la mezcla después de este proceso. Este procedimiento lo lleva a cabo una prensa, con una cara de compresión que se ajusta a las dimensiones del molde. Al ser este el último proceso antes del cultivo existe la posibilidad de manipular el material para mejorar la transferencia de humedad, gases y temperatura a lo largo de la plancha. Para esto se propone que la cara de la prensa esté cubierta por un patrón de agujas, que penetren el sustrato mientras es comprimido. Esto genera canales que podrían mejorar la transferencia entre el micelio en crecimiento y las condiciones de cultivo.

Tabla 4.16: Tabla resumen proceso de prensado

Régimen de operación	Batch, diario
Condiciones de operación	Planta limpia
Equipos involucrados	Prensa
Personal requerido	Operación

I: Cultivo

El objetivo de este proceso es que el micelio colonice el sustrato por completo. Para esto el sustrato inoculado se deja crecer por un periodo entre una y tres semanas en condiciones óptimas. El molde relleno se coloca en columnas sobre ruedas (*i.e. racks*) las cuales son ingresadas a la sala de cultivo. Esta sala debe tener control de temperatura, humedad y gases, que son las variables que influyen sobre la producción de biomasa de micelio. La producción de biomasa de micelio requiere agua, oxígeno, CO₂ y sustrato, como se discutió en el marco teórico, y genera agua residual, CO₂ y calor. A medida que el micelio coloniza el sustrato, este último se va degradando, perdiendo parcialmente su estructura inicial. El cultivo se realiza en dos etapas, una primera con molde y la segunda sin este. Se retira el molde del cultivo una vez que el micelio haya adherido el sustrato y el material logre mantener sus dimensiones. Se coloca así el material de vuelta en la sala de cultivo, en el *rack* sobre una superficie perforada, sin el molde la transferencia entre el medio y el micelio aumenta y el crecimiento en las superficies no es inhibido por la presencia del molde. Los tiempos de cultivo tendrían que ser determinados experimentalmente a esta escala.

Tabla 4.17: Tabla resumen proceso de cultivo

Régimen de operación	Semi-batch, diario
Condiciones de operación	Planta limpia
Equipos involucrados	Sala de cultivo
Personal requerido	Operación, supervisión

J: Secado

El secado comienza una vez que el material se retira de la sala de cultivo, el objetivo es extraer la totalidad del agua contenida por el material. Para esto, varios principios de transferencia pueden ser empleados. En este caso el secado se hace en una cámara de secado, que alimenta aire caliente y retira aire húmedo. Se propone que la cámara tenga una baja presión interna para así facilitar el traspaso del agua al aire, ya que la energía requerida para pasar de estado líquido a gaseoso como humedad es reducida. A través de este proceso el micelio en el material queda inactivado, es decir que el organismo muere y el material resultante es inerte. El resultado es una plancha de MMC listo para su aplicación como producto de construcción.

Tabla 4.18: Tabla resumen proceso de secado

Régimen de operación	Batch, diario
Condiciones de operación	Planta
Equipos involucrados	Secador
Personal requerido	Operación

Lineas secundarias

Inóculo: Micelio

En este proceso se produce biomasa de micelio a través de su cultivo inicial. Como semilla para este cultivo se ocupa micelio de hongo, proveniente de bancos, de muestras de tejidos o de esporas. El cultivo puede ser en medio líquido o sólido, se evalúan ambos casos como opciones. El cultivo sólido parte con la inoculación sobre agar. Normalmente se ocupa agar papa y dextrosa (APD) para esta etapa. Se cultiva el micelio en una incubadora hasta que cubre todo el agar. Este se corta y se mezcla con granos cereales esterilizados. Para finalizar se cultiva el grano inoculado en una sala de cultivo a 27°C y sobre 70 % HR, hasta que el micelio cubra completamente el grano, quedando listo para su uso en la línea principal, como muestra la Figura 3.2.

Alternativamente, se puede cultivar el micelio en un sustrato líquido. Tanto el sustrato sólido como el líquido son compatibles con el proceso de inoculación de la línea principal. Para iniciar el inóculo líquido se pueden usar las mismas fuentes de micelio que para el inóculo sólido, el micelio se cultiva también en agar en un principio. Una vez esté cubierto por micelio, el agar se segmenta para inocular el medio líquido estéril en algún recipiente de pequeña escala como un matraz de Erlenmeyer. Este se sitúa en una incubadora agitada a 37°C hasta obtener suficiente biomasa para realizar un pasaje a biorreactores de mayor escala. La cantidad de sub-cultivos y los tiempos requeridos en cada uno se deben determinar experimentalmente. El sustrato líquido debe contener carbón, nitrógeno y minerales principalmente.

Aditivo: Vidrio

Como materia prima para este aditivo se puede ocupar vidrio residual de procesos de construcción, manufactura o de productos descartados. Es necesario manejar dos variables de este producto, el tamaño de grano y la esterilidad. El tamaño se puede estandarizar a través de un proceso de tamizado y de chancado, el tamaño de grano ideal no ha sido determinado, en el proceso experimental se utilizaron granos de a lo mas 3 [mm] de diámetro, mezclados con polvo granos muy pequeños similares a una arena fina. La esterilidad del producto se logra a través de un proceso de esterilización en autoclave.

Aditivo: Yute

La arpillera de yute se obtiene desde un proveedor en las condiciones necesarias para su uso en el proceso. Solo hace falta asegurar su esterilidad. Esto se puede lograr a través de un proceso de esterilización en autoclave, o rociándolo con productos de limpieza como alcohol etílico, lo que significaría un menor grado de esterilidad.

Insumo: Molde

El molde se utiliza para contener la mezcla de sustrato, micelio y aditivos, este además tiene incidencia sobre los fenómenos de transferencia que ocurren entre la mezcla y su entorno durante el cultivo. En principio el único requerimiento del molde es que el contenido mantenga las dimensiones para formar la plancha rectangular de 1 [m] de largo por 0,5 [m]

de ancho y 0,05 [m] de grosor, pero se puede incluir en su diseño detalles como la inclusión de perforaciones que permitan el traspaso de gases y agua, asegurándose que no permitan la pérdida de mezcla. También el molde podría tener puntos de apoyo que lo eleven de manera de permitir flujos entre su superficie inferior y la repisa. Los moldes son reutilizables, por lo que una vez adquiridos solo hace falta limpiarlos para ser utilizados de nuevo. Se muestra un diseño preliminar en el Anexo C.

4.2.4. Procesos de producción alternativos

La línea de producción recién descrita resulta de la adaptación del proceso base desde la escala de laboratorio a la escala industrial. Esta propuesta no trae mayores cambios a los métodos de producción presentados en literatura, por lo que se espera que los materiales producidos a través de este tengan ventajas y limitaciones en su aplicación como aislantes similares a las reportadas en literatura. Usando como guía la metodología del marco lógico, que orienta las actividades hacia el objetivo del proyecto, se diseñan dos líneas alternativas de producción que signifiquen potenciales mejoras en los aspectos relevantes definidos en la misma metodología. La primera alternativa propone un pre-cultivo del micelio sobre el sustrato, con el fin de reducir los tiempos de cultivo. La segunda alternativa propone incorporar prácticas de la industria de producción de setas en la preparación del sustrato, para mejorar la escalabilidad y reducir los costos de de operación. Los procesos aquí presentados se rigen por las mismas bases de diseño que el proceso base.

Primera alternativa: Pre-cultivo de micelio

Esta alternativa busca disminuir los tiempos de cultivo requeridos para producir el material. En la etapa experimental de la memoria, el cultivo demoró 14 días. Este tiempo puede resultar ser una limitante para la implementación de los MMC en el mercado. Dependiendo del modelo de negocio que se emplee, el desfase entre el inicio de la producción y el despacho del producto puede generar problemas de gestión, haciendo necesario manejar un stock de seguridad y/o predecir la demanda del material para no tener tiempos de espera demasiado largos para los clientes.

Las técnicas de pre-cultivo o de fermentación en dos etapas suelen emplearse en cultivos de microorganismos u otras formas de biomasa, en fase líquida o sólida. Esta técnica consiste en realizar un primer cultivo que permita aumentar la biomasa deseada, de forma que en el inicio del segundo cultivo haya una mayor concentración de biomasa que en el caso de una fermentación en una sola etapa. Esta diferencia ha demostrado generar cambios en distintos tipos de cultivo, sobre las concentraciones finales de biomasa y de productos (intra o extra celulares), en la velocidad de crecimiento y en los tiempos de cultivo necesarios para llegar a cierto nivel de concentración de producto [83], [84], [85].

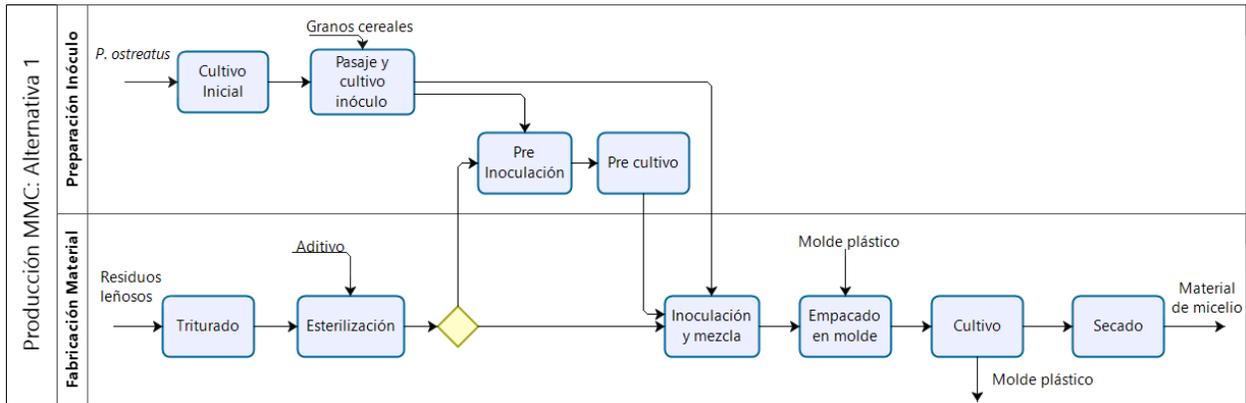


Figura 4.10: Diagrama de bloques de la primera alternativa al proceso de producción.

El diagrama de la Figura 4.10 muestra los procesos unitarios de esta alternativa, donde la única diferencia al proceso base es la adición de dos bloques, la pre-inoculación y el pre-cultivo. Desde la esterilización se separa una fracción del sustrato y se inocula con micelio en la etapa de pre-inoculación, siguiendo la misma regla de mezcla que en el proceso base. El sustrato inoculado se pasa a un cultivo en las mismas condiciones ambientales que en el cultivo original. Una vez colonizado por completo el sustrato cubierto por micelio será disgregado, rompiendo la red micelial y dejándolo en pequeñas aglomeraciones separadas. Estas últimas son adicionadas al sustrato estéril en el proceso de inoculación y mezcla junto con el inóculo y el aditivo utilizado, siguiendo una regla de mezcla adaptada a la modificación realizada. El rompimiento de la red micelial estimula el crecimiento del micelio [13], [62]. Con la biomasa adicional al inicio del cultivo se espera que los tiempos de cultivo se reduzcan. La proporción de sustrato pre-inoculado producido y utilizado en cada molde tiene que ser determinada de forma empírica.

Segunda alternativa: Producción con sustratos específicos

Tanto investigaciones científicas y manuales de producción de MMC definen que para evitar contaminación durante el cultivo es necesario esterilizar el sustrato. Esto normalmente se logra con altas temperaturas y con posterior manejo estéril del sustrato. Este procedimiento tiene deficiencias significativas a la hora de escalar el proceso, de partida, la esterilización a altas temperaturas de grandes volúmenes demanda un alto consumo energético para calentar el agua de esterilización, y luego, el manejo estéril de esos grandes volúmenes generan un desafío importante de logística al requerir ambientes limpios y mecanismos de transporte y manipulación del sustrato que no lo contaminen nuevamente. El proceso base propone el uso de un túnel esterilizador continuo y cinta transportadora para reducir las complicaciones y costos energéticos que significarían utilizar un autoclave y paquetes de sustratos discretos, aunque aún hay un coste energético significativo asociado a la esterilización, y el manejo en cintas transportadoras no asegura que el sustrato se mantenga estéril.

La industria de las setas ya se había enfrentado a este problema en la preparación del sustrato que utiliza. Se han utilizado distintas soluciones, pero el proceso que se propone para esta alternativa parece el más atractivo por su bajo gasto energético y por la facilidad de manipulación que permite a gran escala. Este proceso consiste en la degradación de las

azúcares simples y otros nutrientes del sustrato mediante una fermentación aeróbica. Esto genera un sustrato específico a los hongos, al no haber disponible alimento para otros organismos. Como muestra la Figura 4.11, el proceso es similar al del proceso base, pero en este caso la esterilización es reemplazada por una fermentación libre, seguida por una esterilización lenta, ambas son descritas a continuación.

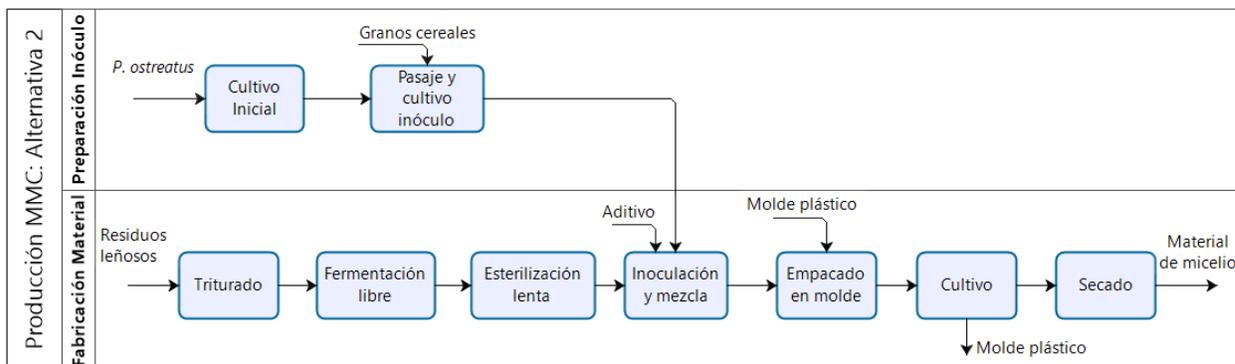


Figura 4.11: Diagrama de bloques alternativa de producción número 2.

El proceso comienza entonces con la fermentación del sustrato para hongos. El sustrato más comúnmente usado en la industria de los hongos comestibles es paja de trigo a veces mezclada con excremento de caballo. La adaptación de este proceso a la materia prima seleccionada para la producción de MMC sería necesaria, aún así el proceso se basa en los siguientes principios. El sustrato en su estado inicial debe ser mezclado con yeso, agua y suplementos de nitrógeno, como nitrato de amonio, urea, guano de pollo o granos de destilería (subproducto de la producción de etanol a partir de maíz). La adición de nitrógeno busca alcanzar valores entre 1,5 % y 1,8 % de concentración en peso seco, con el propósito de, al igual que el agua, permitir la proliferación de los microorganismos responsables de la fermentación. El yeso es adicionado para flocular aceites y químicos presentes en el sustrato, evitando que estos se acumulen en los poros, que después son esenciales para permitir el flujo de aire a través del compost. Se adiciona yeso en una proporción de 19 [kg] por tonelada de mezcla [86].

Como se muestra en la Figura 4.12 a), el compost se dispone en hileras de altura y ancho entre 1,5 y 2 [m], tan largas como sean necesarias. A través de maquinaria específica para este propósito se mueve el compost dejándolo en forma de hileras, con el sustrato compacto en los lados pero suelto en el centro. Las hileras se arman sobre lozas con surcos, como los que se muestran en b), bajo las lozas corren flujos controlados de aire que salen por orificios como el señalado por la flecha, con lo que se logra un ambiente aeróbico para la fermentación. Las hileras se hidratan, se mezclan y se vuelven a armar en intervalos de 2 a 3 días aproximadamente, a no ser que se encuentren a altas temperaturas (entre 60 y 80°C), lo que indicaría que los microorganismos están en condiciones óptimas de fermentación. Si los niveles de humedad, oxígeno, nitrógeno o azúcares básicas salen de su rango de operación durante el proceso, este se detendrá, por lo que es necesario supervisar el proceso y suplementarlo en el caso de ser necesario [86].

El proceso de fermentación libre demora entre 6 y 14 días, dependiendo de las características del sustrato y las condiciones iniciales principalmente. Durante el proceso el cambio en el sustrato es resultado de la actividad microbiana, las altas temperaturas y de reacciones

químicas exotérmicas. Los indicadores del final de este proceso son específicos al sustrato de paja, por lo que también habría que definirlos para otros sustratos, estos son que el compost tenga un color café dorado, la paja esté blanda y flexible, la mezcla tenga un contenido de humedad entre 68 % y 74 %, y haya un olor fuerte a amonio. En este punto el sustrato ya es específico al crecimiento de hongos degradadores de lignocelulosa [86].



Figura 4.12: a) Pilas de sustrato en el proceso de fermentación libre, b) canales de aireación, c) Exterior de una pieza de esterilización y máquina de llenado, d) pieza de esterilización tipo túnel. *Nota.* Extraída de [86].

Luego de la fermentación va la esterilización lenta, esta tiene por objetivo eliminar plagas como insectos, nematodos, hongos y microorganismos, además de acondicionar el sustrato para el crecimiento del micelio, al consumir el exceso de amonio presente que es inhibitorio en concentraciones sobre 0,07 % para el micelio. Este proceso se puede realizar en grandes habitaciones como la que se muestra en la Figura 4.12 d), que también cuentan con lozas ventiladas y control automático de flujo de aire. La disposición del compost en estas salas debe ser uniforme en profundidad y compactación, para obtener una esterilización homogénea. En esta etapa ciertas bacterias pertenecientes a la clase actinomicetos, presente naturalmente en el ambiente, consumen oxígeno, carbohidratos y el amonio disponible, liberando CO_2 y produciendo biomasa que después puede ser degradada por el micelio de hongos como el utilizado en la memoria. Estas bacterias son termofílicas y su metabolismo aumenta la temperatura del sustrato siendo esterilizado. Se mantiene la temperatura del sustrato entre 60 y los 70°C por periodos de a los menos 6 horas para que la temperatura logre la esterilización y los microorganismos hayan reducido el contenido de amonio. Solo falta enfriar el sustrato a 30°C para poder inocularlo de forma efectiva.

4.2.5. Balances de masa proceso base

A través de los balances de masa se definen los flujos másicos a lo largo del proceso, necesarios para dimensionar luego los equipos a utilizar. Se definen además las caracterizaciones y los regímenes de operación de los flujos. Para sintetizar esta sección se divide el proceso en tres secciones, preparado, inoculación y cultivo.

Sección preparado



Figura 4.13: Diagrama de flujos sección de preparado

Supuestos:

- La llegada de material lignocelulósico representada en F1 es periódica y constante.
- La masa de F1 es suficiente para para producir 880 m³ al mes de aislante térmico (requisito bases de diseño).
- F2 y F3 se consideran iguales, ya que el triturador solo realiza un proceso mecánico.

Valores:

Tabla 4.19: Flujo de masa y contenido de sección preparado.

Nombre	Contenido	Flujo másico	Régimen
F1	Poda de viña	208.641 [kg/mes]	Discreto
F2	Poda de viña	870 [kg/h]	Continuo
F3	Madera triturada	870 [kg/h]	Continuo

Las diferencias de unidades de F1 respecto al resto, tiene la intención de reflejar la naturaleza del proceso de recolección de materias primas. No es posible tener un flujo constante en la entrada en la operación real, al depender de la disponibilidad y de la recolección de la materia prima. Definir el rango de tiempo en un mes (*i.e.* cuatro semanas) refleja que ese es el flujo total que debería haber cada mes. Tolva 1 tiene la capacidad de almacenar este material y alimentarlo de forma continua al triturador.

Sección inoculación

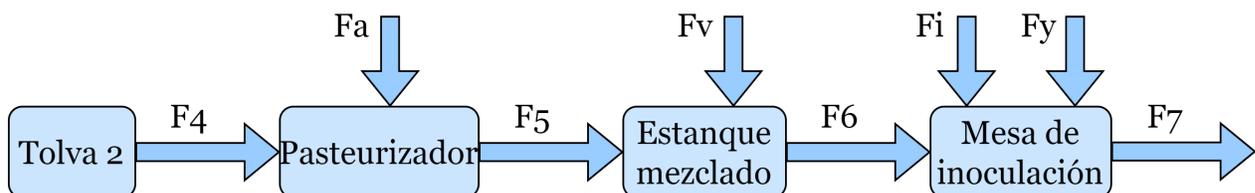


Figura 4.14: Diagrama de flujos sección de inoculación

Supuestos:

- El sustrato en F5 sale hidratado al 60 % del esterilizador.
- El agua de entrada al esterilizador F_a , es igual a la diferencia entre F5 y F4.
- El vidrio se alimenta en F_v a un 35 % de la masa de F5.

Valores:

Tabla 4.20: Flujo de masa y contenido de sección esterilización.

Nombre	Contenido	Flujo másico	Régimen
F4	Madera triturada	870 [kg/h]	Continuo
F_a	Agua	348 [kg/h]	Continuo
F5	Sustrato húmedo	1.217 [kg/h]	Continuo
F_v	Vidrio triturado	426 [kg/h]	Discreto
F6	Sustrato húmedo	1.643 [kg/h]	Discreto

Sección cultivo

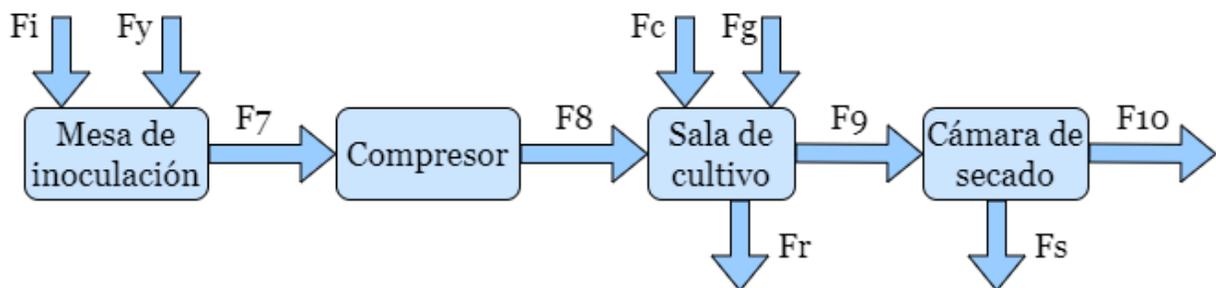


Figura 4.15: Diagrama de flujos sección de cultivo

Supuestos:

- El inóculo de micelio en grano F_i , y el yute aditivo F_y , ingresan en proporción según el promedio de los registros de la etapa experimental.
- F_7 y F_8 son iguales ya que el compresor solo realiza un proceso mecánico.
- El flujo F_c representa el agua necesaria para mantener la humedad relativa en la sala de cultivo, cercana a 70 %. Se estima un valor en función del tamaño de las salas.
- Para calcular F_c se utiliza el supuesto que se requiere tres veces la cantidad de agua necesaria para alcanzar 70 % HR en el volumen de las salas para mantener esa concentración durante el día.
- F_g representa el flujo de aire necesario para mantener las concentraciones óptimas de CO_2 y O_2 dentro de la sala de cultivo, no se determina por ser manejado de forma variable durante la operación.
- F_r representa la fracción de agua que se pierde como humedad ambiental en la sala de cultivo.

- F_s es el agua residual del secado de los materiales de micelio, y es la diferencia entre F_{10} y F_9 .

Tabla 4.21: Flujo de masa y contenido de sección cultivo.

Nombre	Contenido	Flujo másico	Régimen
F_i	Inóculo sólido	425 [kg/h]	Discreto
F_y	Arpillera de yute	34 [kg/h]	Discreto
F_7	Mezcla MMC	2.102 [kg/h]	Discreto
F_8	Mezcla MMC	2.102 [kg/h]	Discreto
F_c	Vapor de agua	16 [kg/h]	Continuo
F_g	Aire climatizado	-	Continuo
F_r	Agua residual	437 [kg/h]	Continuo
F_9	MMC húmedo	1.665 [kg/h]	Discreto
F_s	Agua residual	1.055 [kg/h]	Continuo
F_{10}	MMC	610 [kg/h]	Discreto

4.2.6. Dimensionamiento

El dimensionamiento consiste en la definición de los equipos usados en cada proceso, y la determinación de sus dimensiones y cantidades. Los insumos son determinados directamente en la estimación de los costos de operación. La selección de equipos influye fuertemente en el proceso de producción resultante y por lo tanto en las propiedades finales del material. Se dimensionan en detalle los equipos definidos como principales, justificando además su elección respecto al cumplimiento de las bases de diseño. El resto de los equipos son definidos secundarios y sus dimensionamientos son resumidos en sus características de catálogo. Se muestran a continuación los equipos principales y secundarios, seguidos por sus dimensionamientos.

Tabla 4.22: Lista de equipos principales de cada alternativa de procesamiento.

Equipos principales		
Proceso base	Alternativa 1	Alternativa 2
Laboratorio de generación de inóculo	Sala de pre-cultivo	Zona de fermentación
Túnel esterilizador		
Sala de cultivo		

Tabla 4.23: Lista de equipos secundarios.

Equipos secundarios		
Tolvas recepción	Estanque agitado	<i>Rack</i> de bandejas
Triturador de ramas	Mesa de inoculación	Bandejas plásticas
Tolvas alimentación	Prensa	Mesa de pre-inóculo
	Cámara de secado	

4.2.6.1. Equipos principales

Laboratorio de generación de inóculo

El laboratorio de generación de inóculo se encarga de producir la biomasa de micelio con la que se inocula el sustrato, tanto en el proceso base como en los alternativos. El laboratorio es una sala equipada, que cuenta con los implementos y condiciones necesarias para manipular y cultivar el micelio con las mínimas posibilidades de contaminación. El inóculo producido en el laboratorio puede ser micelio en sustrato sólido o líquido. Se definen entonces los equipos básicos del laboratorio y luego los específicos para el cultivo en medio sólido y los específicos al cultivo en medio líquido.

Equipos básicos de laboratorio

Se resumen en la Tabla 4.24 los equipos necesarios básicos para implementar un laboratorio de producción de inóculo. La selección de estos equipos se basa en la experiencia del autor y la ayuda de expertos en el área. Se presentan en la Tabla 4.25 los precios determinados a través de la cotización de los equipos. Estos precios serán utilizados luego para estimar los costos de inversión asociados a cada alternativa.

Tabla 4.24: Equipos base para laboratorio.

Equipo	Dimensión característica	Valor	Unidad	Referencia
Lavamanos	Volumen interno	126	[L]	ImportadoraRC
Mesa acero inoxidable	Superficie	1,08	[m ²]	ImportadoraRC
Agitador magnético	Volumen de mezcla	100 - 1.000	[ml]	Cromtek
Potenciómetro	-	-	-	Cromtek
Balanza semi-analítica	Precisión	0,1	[g]	Cromtek
Cámara de flujo laminar	Filtro de partículas	0,3	[µm]	Cromtek
Incubadora placas Petri	Capacidad	6	Placas	Cromtek
Refrigerador y freezer	Volumen interno	370	[L]	Cromtek
Autoclave	Volumen interno	23	[L]	Cromtek

Tabla 4.25: Cotización de equipos base para laboratorio.

Equipo	Precio [\$USD]	Unidades necesarias	Costo total [\$USD]	Referencia
Lavamanos	113	1	113	ImportadoraRc
Mesa acero inoxidable	113	2	226	ImportadoraRc
Agitador magnético	159	1	159	Cromtek
Potenciómetro	249	1	249	Cromtek
Balanza semi-analítica	395	1	395	Cromtek
Cámara de flujo laminar	1560	1	1560	Cromtek
Refrigerador y freezer	904	1	904	Cromtek
Autoclave	1980	1	1980	Cromtek
Total			5.586	

Cultivo en sustrato sólido

Para cultivar el inóculo en sustrato sólido hace falta los equipos básicos de laboratorio junto con los equipos específicos a la producción de inóculo sólido, definidos en la Tabla 4.26. Se presentan los costos asociados a la adquisición de estos equipos en la Tabla 4.27.

Tabla 4.26: Equipamiento necesario para la producción de inóculo sólido.

Equipo	Dimensión característica	Valor	Unidad	Referencia
Incubadora	Capacidad	52	[L]	Cromtek
Estantería metálica	Superficie disponible	1,05	[m ²]	Nibec
Sala de cultivo	Superficie	10	[m ²]	-
Humidificador	Área de cobertura	10	[m ²]	TuCultivo
Aire acondicionado	Área de cobertura	18	[m ²]	MiClimo
Controlador temperatura y humedad	Sensores	Termostato e higróstico	-	Micosecha

Tabla 4.27: Cotización equipamiento necesario para la producción de inóculo sólido.

Equipo	Precio [USD]	Unidades necesarias	Costo total [USD]	Referencia
Incubadora	9.438	1	9.438	Cromtek
Estantería metálica	35	3	104	Nibec
Sala de cultivo	2.300	1	2.300	-
Humidificador	58	1	58	TuCultivo
Aire acondicionado	562	1	562	Miclimo
Controlador temperatura y humedad	147	1	147	Micosecha
Total			12.600	

Cultivo en medio líquido

Los equipos necesarios para la producción de inóculo líquido se presentan en la Tabla 4.28, y sus costos en la Tabla 4.29. Luego se presenta un resumen de los costos de inversión asociados

Tabla 4.28: Equipamiento necesario para producción de inóculo líquido.

Equipo	Dimensión característica	Valor [L]	Referencia
Incubadora agitada	Volumen interno	56	Cromtek
Biorreactor	Volumen	40	Eppendorf
Biorreactor	Volumen	150	Eppendorf

Tabla 4.29: Cotización laboratorio inóculo líquido.

Equipo	Precio [USD]	Unidades necesarias	Costo total [USD]	Referencia
Incubadora agitada	9.438	1	9.438	Cromtek
Biorreactor 40 [L]	32.000	2	64.000	Eppendorf
Biorreactor 150 [L]	68.000	1	68.000	Eppendorf
Total			141.438	

Se resume a continuación los costos de inversión totales para el equipamiento básico de laboratorio, y para el equipamiento específico requerido para la producción de inóculo sólido e inóculo líquido.

Tabla 4.30: Costos de inversión asociados a cada tipo de laboratorio.

Clase	Precio [USD]
Laboratorio básico	5.586
Lab. inóculo sólido	18.186
Lab. inóculo líquido	147.024

Túnel de esterilización

Este equipo es responsable de la esterilización del sustrato utilizado para el cultivo de materiales de micelio. La esterilización suele realizarse en escala de laboratorio en regímenes batch, dentro de autoclaves. En estos, la alta temperatura y presión asegura una total destrucción de los microorganismos presentes. La utilización de autoclaves a gran escala, a pesar de ser factible, implica un alto consumo energético y costos de inversión asociados. Se opta entonces por un método continuo de esterilización, utilizando un túnel pasteurizador, equipo que usualmente se ocupa para la pasteurización de alimentos envasados. Se propone la adaptación de este equipo para el procesamiento de material lignocelulósico triturado. Se calcula el consumo energético e hídrico a continuación para determinar los costos operacionales asociados a este proceso.

Como P. Jonás explica en [87], el material siendo esterilizado pasa por zonas de calentamiento y luego de enfriamiento. En cada zona se le rocía agua a una temperatura específica. Distintos sistemas se han diseñado para el suministro de agua en estos equipos, y nuevos métodos los han hecho más eficientes. Al incorporar en el diseño la recuperación del agua rociada y el aprovechamiento de su calor contenido, se ha llegado al sistema de pares regenerativos. En este el agua recirculada de una zona se utiliza como parte del agua rociada en otra zona con una temperatura de operación similar a la del reciclo. Esto permite reducir los costos de calefacción y de consumo hídrico [87]. A pesar de su importancia en estos sistemas, el estudio de los fenómenos de transferencia entre el agua y la madera triturada quedan excluidos del alcance de este dimensionamiento.

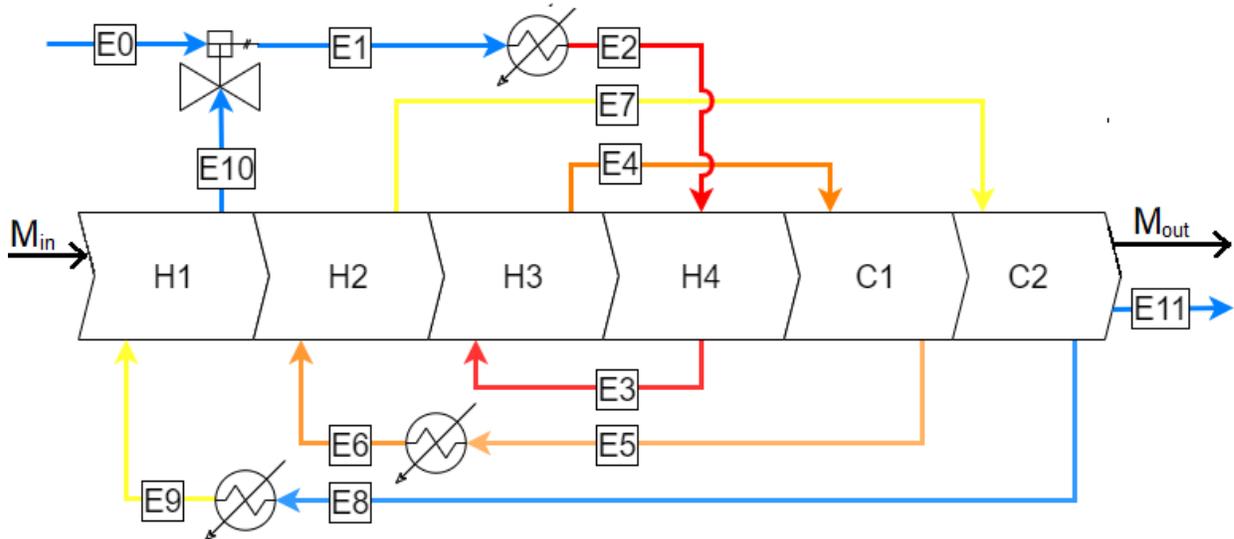


Figura 4.16: Esquema del sistema de pares regenerativos del túnel de esterilización.

Supuestos de operación:

- El flujo E_0 alimenta a más que solo a E_1 , también alimenta a E_3 , E_5 y E_8 . Lo cual no se representa en el diagrama por simplificación.
- La temperatura de entrada del sustrato en M_{in} es 20°C , de salida son 40°C , y la temperatura máxima que alcanza son 80° .
- El pasteurizador funciona con recirculación del agua en tres pares regenerativos [87].
- Un 40% del flujo rociado en cada sección sale del sistema como agua que hidrata la madera.
- Los tiempos de residencia en las zonas del pasteurizador son suficientes para permitir la transferencia de calor hasta el interior del material siendo esterilizado.
- La esterilización del sustrato se logra al alcanzar los 80°C .
- Los rociadores operan con los mismos flujos en cada zona.
- La diferencia entre el flujo rociado y el reciclado es el mismo en cada zona (40% del flujo reciclado).

Dadas estas condiciones de operación, la masa y temperatura de los flujos, y los consumos de agua y energía son los siguientes.

Tabla 4.31: Flujos másicos y sus temperaturas en el túnel esterilizador.

Flujo	Masa [L/h]	Temperatura [°C]	Flujo	Masa [L/h]	Temperatura [°C]
E0	347,73	30	E6	144,89	70
E1	144,89	30	E7	144,89	45
E2	144,89	85	E8	57,96	35
E3	57,96	75	E9	144,89	65
E4	144,89	55	E10	57,96	50
E5	57,96	40	E11	347,73	30

Tabla 4.32: Calor requerido para la operación del túnel esterilizador.

Intercambio	Diferencia temperatura [°C]	Masa a calentar [kg/h]	Entrada de calor [kJ/h]
E1 → E2	30 → 85	144,89	33.310,21
E0 + E3	30 → 75	86,93	16.351,53
E0 + E5	30 → 40	86,93	3.633,67
E0 + E5 → E6	40 → 70	144,89	18.169,21
E0 + E8	30 → 35	86,93	1.816,84
E0 + E8 → E9	35 → 65	144,89	18.169,21
Consumo total			91.450,67

El consumo de agua del equipo queda definido por el flujo E0, igual a 347,3 [kg/h]. Además de esto el equipo requiere un estanque de al menos 174 [L] (se define de 200 [L]) para suplir los flujos E4 y E7 desde el arranque del equipo hasta llegar a estado estacionario. El consumo de 91450,67 [kJ/h] para calentar el agua se traduce a 25,40 [kW/h], considerando una eficiencia del 80% para el calefactor de agua, el consumo asciende a 31,75 [kW/h]. El túnel se estima de un largo de 8 [m] y un ancho interior de 1,5 [m]. El material tiene un tiempo de residencia de 10 minutos al interior del equipo, con lo que avanza a 0,8 [m/minuto].

Sala de cultivo

La operación de la sala de cultivo juega un rol fundamental en lograr un producto de forma consistente y a la altura de la calidad que se busca. Lograr mantener condiciones homogéneas en su interior y generar un diseño que permita añadir y sacar estanterías con materiales sin perturbar el resto del cultivo son los principales puntos a considerar. Para dimensionar la sala de cultivo hay dos factores principales a considerar, primero el tiempo de cultivo, donde a mayor sea este más grande tendrá que ser la sala para lograr sostener más cultivos en paralelo, y segundo las dimensiones de las estanterías de moldes, su distribución vertical y horizontal determinarán las dimensiones necesarias de la sala que los contiene. A continuación se definen estos parámetros para dimensionar la sala de cultivo.

Para partir se asumirá un periodo de cultivo de 12 días. Este supuesto se respalda en el tiempo de cultivo experimental de 16 días que no ha sido optimizado. En el caso de producción a escala industrial 12 días parece razonable, considerando además los tiempos

de cultivo reportados de hasta 10 días [37], [62]. Luego, la estantería de moldes se define en función de sus componentes y de las dimensiones de los mismos moldes. Se muestra en la Figura 4.17 un diagrama de la estantería y a continuación en la Tabla 4.33 sus dimensiones totales y de sus componentes.

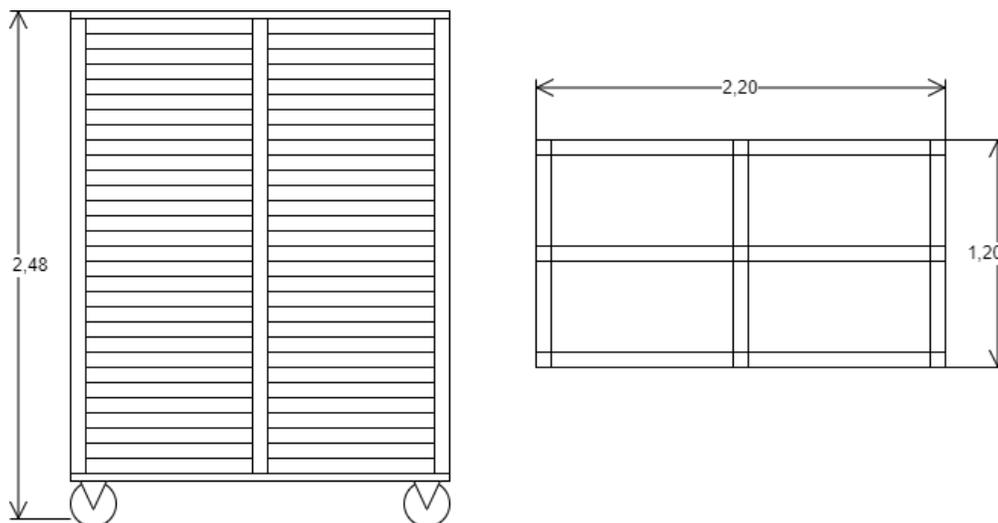


Figura 4.17: Vista lateral de la estantería a la izquierda y a la derecha vista superior.

Tabla 4.33: Dimensiones estantería de moldes

Dimensionamiento estantería de moldes	
Número de pisos	30
Columnas por estantería	4
Altura molde [cm]	5
Altura por piso [cm]	3
Altura ruedas [cm]	8
Altura estantería [m]	2,48
Largo molde [cm]	100
Número de moldes a lo largo	2
Largo adicional por molde [cm]	10
Largo estantería [m]	2,20
Ancho plancha [cm]	50
Número de moldes a lo ancho	2
Ancho adicional por molde [cm]	10
Ancho estantería [m]	1,20

La capacidad de moldes totales por estantería es de 120. Considerando que el balance de masa indica que al día se deben ingresar 25.226 [kg] aproximadamente a la sala de cultivo y que la densidad de la mezcla húmeda a la entrada del cultivo es de 673 [kg/m³] (dato experimental), significa que se deben ingresar 1500 moldes al día, lo que se traduce a 12,5 es-

tanterías de moldes. Dado el número de estanterías necesarias por día, se consideran también estanterías con tan solo dos columnas de moldes. La cantidad de estanterías por día permite determinar las dimensiones de la sala de cultivo necesaria para ingresar los moldes de un día de producción. El área mínima para contener las estanterías es 34,6 [m²] de superficie, con un cielo de al menos 2,5 [m] de alto. Se muestra en la Figura 4.18 un diseño preliminar de una de las salas de cultivo, capaz de almacenar el material producido en un día.

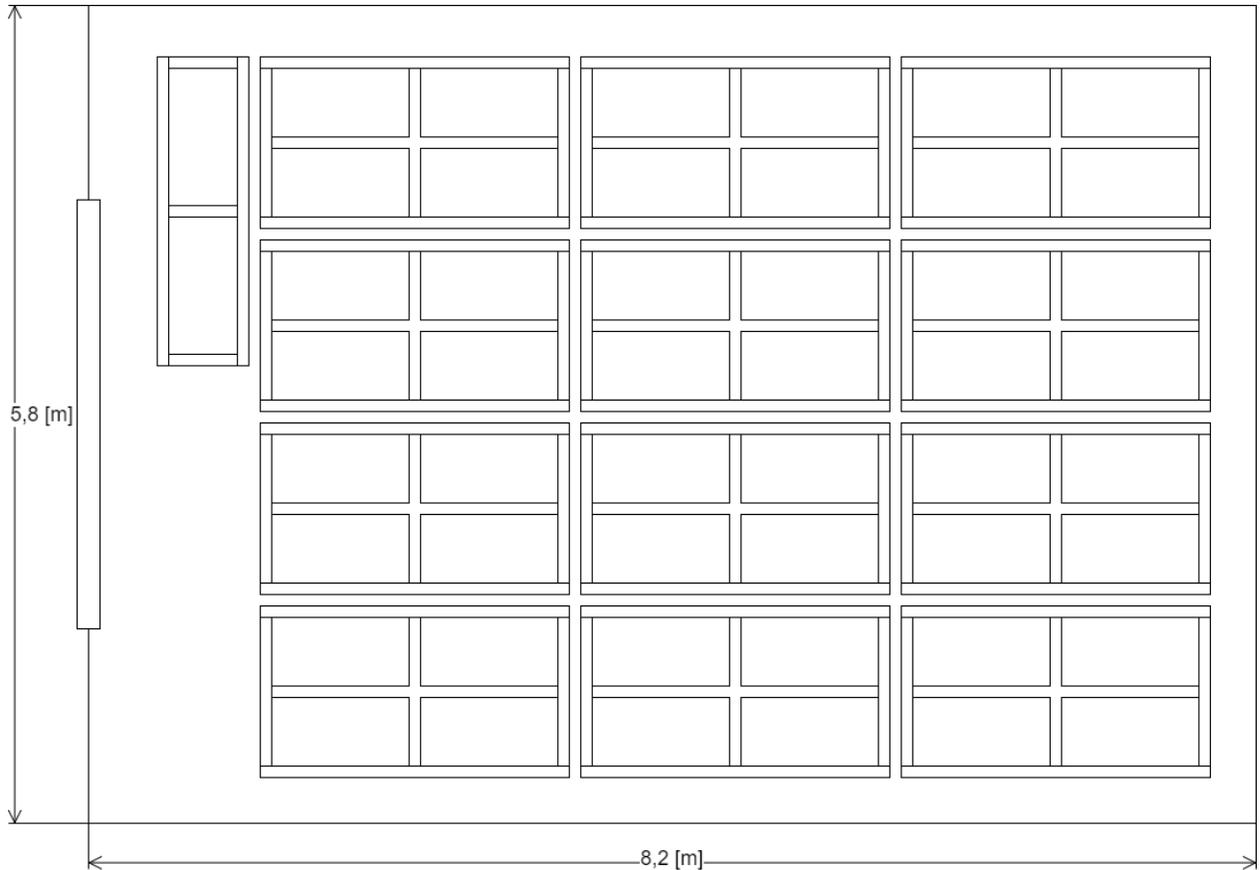


Figura 4.18: Vista superior de una de las salas de cultivo, con estanterías en su interior.

Las dimensiones presentadas en la Figura 4.18 corresponden a suma de los largos y anchos de las estanterías si se disponen en la orientación presentada en la misma, sumando una holgura de un metro en cada vértice. El área total de la sala es de 47,6 [m²]. Considerando que el tiempo de cultivo dentro de una de estas salas es de 12 días, se requieren a lo mínimo 12 salas para mantener una producción diaria constante. El régimen de operación de la planta diseñada es de 5 días de producción a la semana, por lo que hay una reducción en la demanda de salas de cultivo. Aún así considerando que existe la posibilidad de que hayan contratiempos en el cultivo o que sea necesario aumentar el nivel de producción o el tiempo de cultivo, se considera para el diseño final de las salas, un total de 14 salas, cada una acondicionada para mantener los niveles de temperatura y humedad necesarias para la proliferación del micelio.

Las salas de cultivo necesarias para la producción radican entonces en la instalación de 14 salas como las definidas anteriormente, acondicionadas para el cultivo de hongos. Se propone un diseño como el que se muestra en la Figura 4.19 para el orden de las salas de cultivo, a

continuación se muestra una cotización de la construcción de un espacio de esas dimensiones. El valor final de la instalación es considerado como el precio del equipo en la evaluación económica.

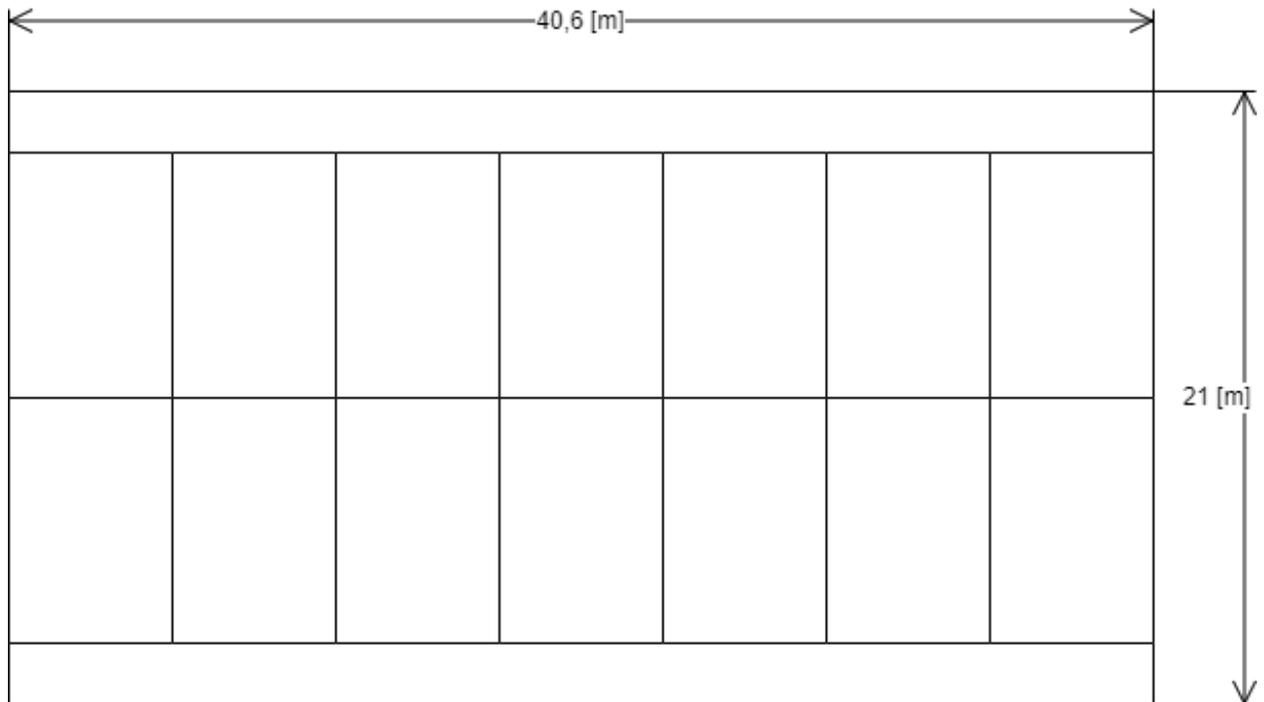


Figura 4.19: Diseño salas de cultivo

La construcción de las salas de cultivo se simplifica para esta evaluación como la construcción de un galpón industrial sobre hormigón. Este consta de 14 salas, cada una con acceso desde un pasillo de 2,3 [m] de ancho. El techo del galpón tiene 4 [m] de alto, esto da una holgura de 1,5 [m] sobre el nivel de las estanterías, permitiendo instalar sistemas de climatización. Se estima el precio de la instalación de la sala de cultivo en función del precio referencial presentado en la Tabla 4.34. El precio estimado se obtiene mediante una relación arbitraria entre distintos precios. Un precio preciso se podría obtener a través de un servicio de consultoría.

Tabla 4.34: Dimensionamiento de la sala de cultivo y precio referencial de instalación similar.

Equipo	Dimensión característica	Valor	Unidad	Precio [USD]	Referencia
Sala de cultivo dimensionada	Ancho x largo x alto	21 x 40 x 4	[m]	42.000	Estimación
Galpón referencial	Ancho x largo x alto	20 x 30 x 6	[m]	39.200	Habitissimo, Metal Galpón

Sala de pre-cultivo

La modificación del proceso en la alternativa 1 requiere del pre-cultivo de una fracción del sustrato. Este proceso a diferencia del cultivo recién dimensionado, no necesita moldes para mantener las dimensiones del material, ya que al final del proceso el sustrato será mezclado para ser ocupado como parte del inóculo en la mezcla. El objetivo de la pre-fermentación es reducir los tiempos de cultivo, para mejorar los tiempos de respuesta de la empresa frente a la demanda de producto. Reducir los tiempos de producto también disminuye la necesidad de área de salas de cultivo. Ya que no hay una correlación clara sobre cómo afectara la modificación del proceso en los tiempos de cultivo, y considerando la contraposición del aumento y disminución de la demanda de espacio para cultivo generada por los fenómenos recién señalados, se considera que una aproximación razonable para el espacio de cultivo y pre-cultivo necesario para la alternativa 1, es el mismo que el espacio dimensionado para el cultivo en el caso base. Por lo que el valor estimado para los procesos de cultivo y pre-cultivo de la alternativa 1 corresponden al valor final de instalación definido en la Tabla 4.34.

Zona de fermentación

La segunda alternativa de procesamiento adiciona al caso base los procesos de fermentación libre y esterilización lenta, y elimina la necesidad de la esterilización del sustrato en el túnel pasteurizador. La fermentación libre es un proceso que se realiza en el exterior y requiere de condiciones de aireación y humedad para llevarse a cabo. El sustrato se coloca en hileras sobre un piso con surcos de aireación como se mostró en la descripción de la alternativa. Para dimensionar la zona de fermentación se determinará la superficie necesaria con canales de aireación y el precio de la máquina volteadora de compost necesaria. Las dimensiones definidas se basan en una serie de aspectos relevantes como los tiempos de fermentación, los balances de masa y de supuestos, presentados a continuación.

Dada la descripción del proceso, las hileras de sustrato tienen 1,5 [m] de alto y 2 [m] de ancho. Una máquina volteadora de compost capaz de generar estas hileras tiene un costo de aproximadamente \$12.000 [USD] (referencia [Alibaba](#)). Para cumplir con la producción definida en las bases de diseño se requiere una masa de sustrato de 208.700 [kg/mes] (*i.e.* cada cuatro semanas). Se define como primer supuesto que la zona de fermentación tiene que tener capacidad para producir 1,5 veces esta cantidad al mes. Se estima que la fermentación lenta de la poda de viña demora cuatro semanas (el doble que en el caso de la paja). La superficie necesaria se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Superficie[m^2] = \frac{M_{req}[kg/mes]}{M_{hilera}[kg/mes]} \cdot Superficie_{hilera}[m^2]$$

Donde *Superficie* es el área de la zona de fermentación, M_{req} y M_{hilera} la masa de sustrato requerida al mes y contenida en una hilera respectivamente, y $Superficie_{hilera}$ el área de una única hilera. Con esto solo falta determinar que dimensiones y masa de sustrato definen a la hilera. Dadas sus dimensiones, el volumen de un metro de largo de hilera es de 2 [m³] aproximadamente, considerando una geometría de parábola inversa en su vista frontal (*i.e.* $y = -1,5x^2 + 1,5$). Considerando una densidad de sustrato húmedo triturado de 512 [kg/m³] (aproximado de datos experimentales) se obtiene entonces una masa de 1024 [kg] por metro de hilera. Así para satisfacer la capacidad requerida de la zona de esterilización, se requieren

306 [m] de hilera aproximadamente.

Para el diseño de la zona de fermentación se definen ocho hileras, de manera que a la semana se armen dos hileras. Así se cosechan dos a la semana para completar los requisitos mensuales de sustrato. Con esto serían ocho hileras de 38,25 [m] de largo. Considerando 2 [m] de ancho más 0,75 [m] de holgura entre hileras, el ancho de la zona de fermentación sería 28 [m]. La superficie total es entonces de 38,25 [m] de largo y 28 [m] de ancho, dando un área de 1071[m²]. Para su implementación se puede optar por el uso de una superficie tipo radier de hormigón armado de 15 [cm] de espesor. Esta tiene un costo de \$13.000 [CLP/m²] aproximadamente [78], resultando en un costo de obra total de \$13.923.000, que incluye materiales, maquinaria, mano de obra y herramientas.

Por último, considerando que cada hilera se posa sobre un surco de ventilación, se incluye el precio de hacer los suros y la instalación de tuberías y sistemas de ventilación como un porcentaje del costo de la obra inicial. Se estima mediante aproximaciones utilizadas a nivel de ingeniería de perfiles que este costo corresponde a un 15 % del precio de la obra inicial [79]. Así el precio de la superficie ventilada es de \$16.000.000 [CLP]. Considerando la superficie y la máquina volteadora el proceso tiene un costo de inversión de \$30.340 [USD].

4.2.6.2. Equipos secundarios

Se presentan a continuación la cotización de los equipos secundarios en la Tabla 4.35. Estos precios sirven como referencia en esta etapa de evaluación del proyecto. Como muestran las referencias, los equipos cotizados cumplen con características similares a las que requiere el proceso, por lo que es posible suponer que los precios son representativos a lo que costaría implementar el proyecto. En el caso de las bandejas y los *racks*, los precios se obtuvieron mediante averiguaciones de proyectos que ya han adquirido productos similares, por lo que no existe una referencia formal que justifique el precio. Se recomienda ahondar el dimensionamiento de estos equipos en el caso de querer implementar el proyecto.

Tabla 4.35: Cotización equipos secundarios.

	Dimensión característica	Valor	Unidad	Precio unitario [\$USD]	Unidades necesarias	Referencia
Tolva recepción	Volumen	2.000	[L]	3.000	2	Alibaba
Triturador	Capacidad	3 - 7	[ton/h]	8.000	1	Alibaba
Tolva alimentación	Volumen	2.000	[L]	3.000	2	Alibaba
Estanque agitado	Volumen	2.000	[L]	3.000	2	Alibaba
Mesa de inoculación	Superficie	2	[m ²]	40	3	Alibaba
Prensa	-	-	-	900	1	Alibaba
Cámara de secado	Volumen	6	[m ³]	20.000	1	Alibaba
Rack de bandejas	Capacidad	120	bandejas	35	375	-
Bandejas plásticas	Superficie	0,5	[m ²]	0,3	40.000	-
Mesa de pre-inóculo	Superficie	2	[m ²]	40	1	Alibaba

4.2.7. Evaluación técnica de las alternativas

A continuación se muestran las calificaciones de cada alternativa según seis criterios de evaluación técnicos, cada uno desglosado en cuatro aspectos. Cada aspecto se calificó entre 1 y 5, siendo 5 la evaluación más favorable para el proyecto. La justificación de la calificación de cada criterio se encuentra en el Anexo D.

Tabla 4.36: Criterios de evaluación técnicos y sus puntajes relativos para cada alternativa.

	Caso base	Alternativa 1	Alternativa 2
Riesgo de negocio	2.5	2.75	2.75
Cumplimiento metas de producción	3	4	3
Cambios en capacidad aislante	3	3	3
Cambios en densidades	2	2	3
Problemas de durabilidad	2	2	2
Factibilidad de implementación	4	4	3.75
Obtención suministros críticos	4	4	4
Riesgo de atrasos en construcción	4	4	4
Constructibilidad	4	4	4
Obtención de equipos	4	4	3

En el contexto de la evaluación técnica de las alternativas, se discuten aquí los puntos débiles identificados en el proceso propuesto. Por puntos débiles se hace referencia a todos los procesos unitarios que en la práctica puede que no resulten como se espera que lo hagan en la teoría. Un primer punto es el de la trituración. Para este proceso se eligió la trituradora de ramas como equipo. La efectividad de este equipo está comprobada al triturar materiales maderosos, que tengan cierta firmeza y dureza. Esto se debe a que esta resistencia hace que el sistema de tambor rotatorio pueda retirar pequeños pedazos de la rama sin que esta se atasque en el mecanismo. Un posible problema puede surgir al utilizar nuevos sustratos según la disponibilidad existente en el contexto de producción. Posibles sustratos como la paja no tienen la suficiente firmeza para ser triturados con este equipo, por lo que nuevas alternativas de trituración tendrían que ser evaluados en este caso.

Otro proceso clave es el de esterilización. Para este se eligió como equipo el tunel esterilizador. La condición de 80°C por 20 minutos definida para este equipo cumple con los requisitos de una pasteurización a nivel de la industria alimentaria, pero estas condiciones no aseguran una esterilidad absoluta. Con ciertos sustratos es posible que no sea suficiente este nivel de exposición al calor para evitar contaminaciones. El autoclave como alternativa mejora el nivel de esterilización pero es altamente demandante de energía además de ser muy elevado su precio de compra. Otras opciones como irradiación con rayos gamma podrían servir para complementar el sistema de esterilización actual sin aumentar demasiado el consumo de energía y los costos de inversión.

Tabla 4.37: Criterios de evaluación técnicos y sus puntajes relativos para cada alternativa.

	Caso base	Alternativa 1	Alternativa 2
Operatividad	3.75	3.75	3.5
Flexibilidad operación	4	4	3
Complejidad operación	4	4	3
Respuestas a eventualidades	3	3	3
Facilidad de ampliación	4	4	5
Mantenibilidad	3.75	3.75	3.75
Facilidad de mantención equipos	4	4	4
Susceptibilidad a averiación	3	3	3
Requerimiento de terceros	4	4	4
Accesibilidad a equipos	4	4	4
Riesgos ambientales	4.5	4.5	4.5
Reducción huella de carbono	5	5	5
Generación de residuos	5	5	5
Liberación de gases	4	4	4
Circulación camiones	4	4	4
Seguridad y salud ocupacional	4.25	4.25	4.25
Manejo de insumos peligrosos	5	5	5
Operación maquinaria peligrosa	3	3	3
Liberación de gases tóxicos	5	5	5
Accesibilidad mantención y limpieza	4	4	4

Como se muestra en la 4.36, el aspecto menos favorable del proyecto es el riesgo de negocio. Para las tres alternativas el puntaje ponderado está bajo 3, lo que se considera una evaluación negativa. La raíz de esta calificación está en la incerteza que presenta el proyecto, al ser el desarrollo de una nueva industria, no hay conocimientos prácticos de cómo se debe llevar a cabo. Al estar este criterio relacionado con la parte económica del proyecto, el alto riesgo se tendrá que reflejar en el análisis de rentabilidad como la inclusión de una prima de riesgo que suba la exigencia del cálculo de rentabilidad, para que este refleje la posibilidad de no lograr concretar el proyecto.

En cuanto a factibilidad de implementación, operatividad y mantenibilidad, se consideran criterios relativamente neutros. El proyecto no presenta características que lo hagan especialmente favorable en estas áreas. La simplicidad del proyecto eso sí, hace que la evaluación sea levemente positiva, ya que implementación y operación son técnicamente sencillas. La seguridad ocupacional y los riesgos ambientales del proyecto son considerados bastante positivos. En estos criterios se refleja la motivación por optar por el desarrollo de los MMC. El potencial que presenta esta industria está en mejorar las sustentabilidad de la producción de materiales aislantes al optar por procesos menos contaminantes y menos intensivos energéticamente, lo que a la vez hace más el proceso más amigables con los operarios.

Se presenta ahora un cálculo del grosor que tendría que tener las planchas de MMC para ser usados como aislante en muros exteriores. Este grosor se calcula según los decretos presentes en la OGUC, Art 4.1.10, que define las resistencias térmicas mínimas en muros, techos y suelos según zonificación del territorio nacional. Para este cálculo se supuso que se utiliza un muro compuesto por dos paneles de OCB estructurales de 11 [mm] de grosor y entre ellos una plancha de MMC con conductividad térmica de 0,045 [W/mK]. Los grosores presentados en la Tabla 4.38 presentan entonces los mínimos requeridos para cumplir con la normativa chilena.

Tabla 4.38: Cálculo de grosores mínimos según requisitos de construcción chilenos.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Rt mínimo [m ² K/W]	0.25	0.33	0.53	0.59	0.63	0.91	1.67
Grosor MMC [mm]	22.7	26.3	35.3	38.0	39.8	52.4	86.6

Estos valores se obtuvieron mediante la siguiente ecuación.

$$R_T = R_{si} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

Donde R_T es la resistencia térmica del muro [m²K/W], su valor mínimo es definido por OGUC y es específico a cada una de las 7 zonas del territorio nacional que define la misma ordenanza. R_{si} , R_{se} son resistencia térmica superficie interior y exterior con valores de 0,12 y 0,05 [m²K/W] respectivamente, e_i y λ_i son el espesor y conductividad del componente i , tomando para el OSB valores de 11 [mm] y 0,13 [W/mK] respectivamente. Considerando los resultados presentados en la Tabla 4.38, los aislantes diseñados pueden ser empleados de forma efectiva desde la zona 1 hasta la 5, ya que el grosor definido para el aislante en esta evaluación es de 50 [mm]. De todas formas es ideal que se opere sobre el mínimo y una capa doble de aislante en los muros seguro ayudaría a aumentar la resistencia térmica, probablemente hasta niveles que superen los estándares más exigentes para muros. Los estándares de resistencia térmica en pisos ventilados y techos son más exigentes que los de los muros. La Figura 4.20 muestra el mapa de las divisiones zonales, indicando las dos con estándares más exigentes.

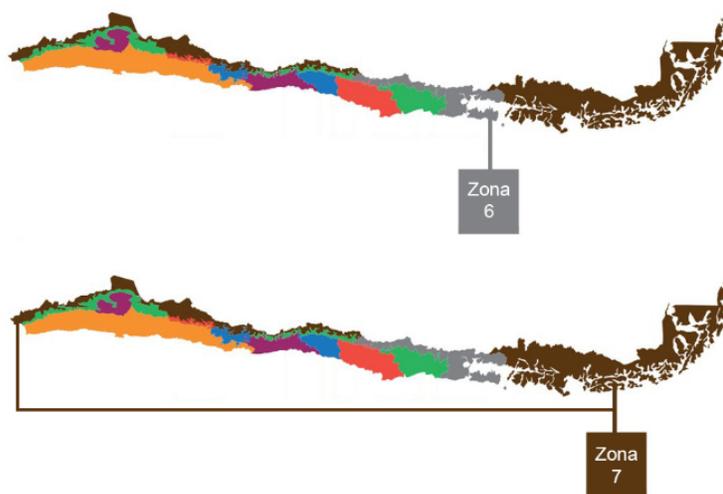


Figura 4.20: Mapa del territorio chileno dividido en zonas térmicas.

4.3. Evaluación económica

El objetivo de esta sección es cuantificar el valor económico de las alternativas presentadas. Esta evaluación se basa en una serie de supuestos presentados en la Tabla 4.39, sumados a los definidos más adelante. Los supuestos presentados tienen limitaciones al aún ser necesario estudiar su validez y precisión, pero en esta etapa de evaluación preliminar permiten definir factores para cuantificar finalmente la rentabilidad del proyecto. Se han ocupado para definir estos valores fuentes formales e informales como información de proyectos similares y opiniones de expertos, que ayudan a validar la evaluación hecha.

Tabla 4.39: Supuestos definidos para la evaluación económica del proyecto.

Supuesto	Valor	Justificación
Año inicio operación del proyecto	2024	De forma que los supuestos sean lo más acertados posibles, se elige el año mas próximo a la finalización de esta memoria.
Precio de venta MMC	325 [USD/ton]	Este precio se define igual al del EPS por [m ³] definido en la Tabla 4.4, ajustado a la densidad de los MMC.
Horizonte de evaluación	10 años	Este horizonte considera desde el periodo de inversión a la operación y mantenimiento. Este horizonte es común en este tipo de proyecto.
Indicador de rentabilidad	VAN	Este permite evaluar la rentabilidad del proyecto en función de un nivel de exigencia definido por la tasa de retorno y la prima de riesgo.
Tasa de descuento	20 %	Se utiliza esta tasa en la actualidad en Chile para evaluar proyectos agroindustriales, se aplica para evaluar la producción de MMC al existir similitudes con este rubro.
Prima de riesgo	20 %	Esta prima de riesgo refleja la incertidumbre generada por la etapa de evaluación temprana en la que se encuentra el proyecto y la inexistencia de un flujo operacional.

4.3.1. Modelo de negocios

El modelo de negocios sitúa al proyecto en el contexto donde se desenvuelve. A través de este se define cómo la empresa interactúa con el mercado y con los clientes de su producto. Este modelo de negocios está basado en una visión personal del mercado, explicitada en la metodología del marco lógico. Además un trabajo previo a esta memoria, presentado a continuación, sirve para comprobar que existen adoptadores tempranos de los MMC. El trabajo comenzó por un proceso de descubrimiento a través de la investigación e interacción con posibles actores, que generó una lista inicial de posibles candidatos. Esta lista fue reducida a través de un proceso de selección que determinó a los candidatos que fueran tanto técnicamente factibles como parte de un rubro que estuviera interesado en implementar este material. La Figura 4.21 muestra el resultado del proceso recién descrito y la Tabla 4.40 muestra los resultados de las interacciones con actores que participan en los rubros seleccionados.

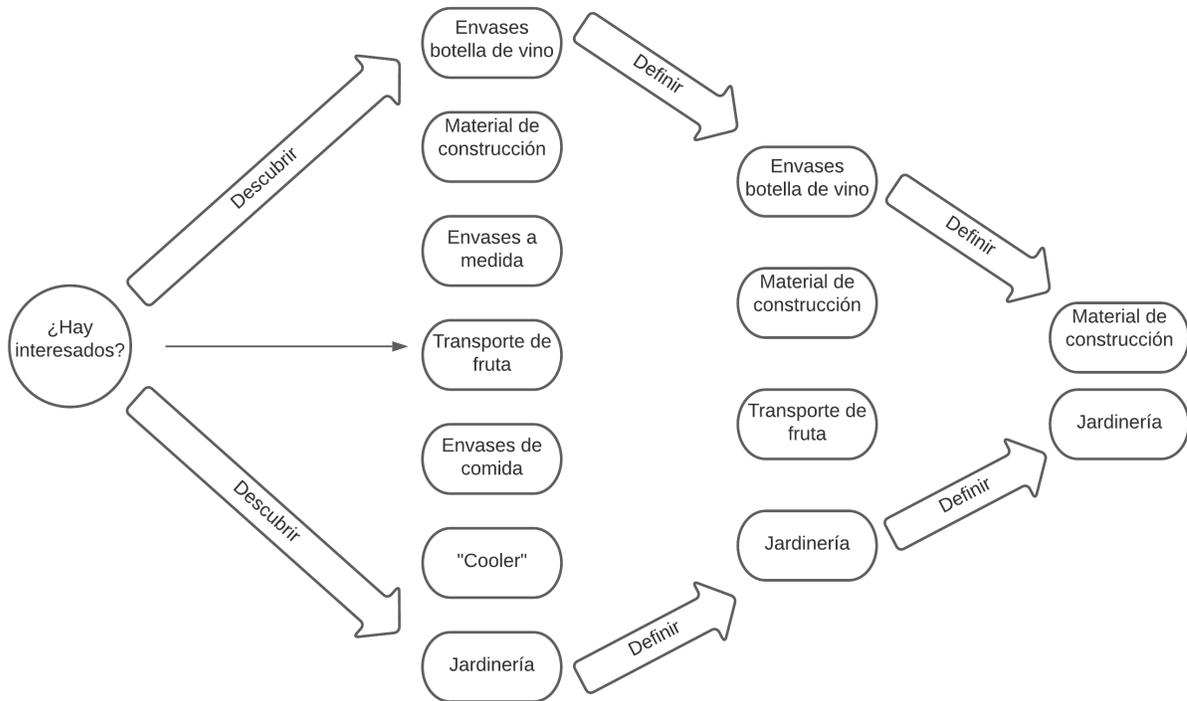


Figura 4.21: Diagrama realizado mediante la metodología del doble diamante, para determinar si existen adoptadores tempranos de MMC.

Tabla 4.40: Resumen de las respuestas a la entrevista realizada a potenciales adoptadores tempranos de MMC en distintos rubros.

	Envases de vino	Material de construcción	Envases a medida	Transporte de fruta	Envases de comida	Coolers	Jardinería
Pregunta 1	2	3	1	2	1	2	2
Pregunta 2	2	2	1	2	1	3	2
Pregunta 3	1	2	2	2	3	1	3
Pregunta 4	3	2	3	2	2	1	3
Pregunta 5	3	3	2	3	2	3	3
Total	11	12	9	11	9	10	13

Las preguntas que fueron usadas como guía para la entrevista de los distintos actores son las siguientes:

1. ¿Utiliza EPS en sus operaciones o productos?
2. ¿Se tienen que hacer cargo del descarte del EPS?
3. ¿Sus clientes se tienen que hacer cargo del descarte del EPS?
4. ¿A sus clientes les importa que ocupen EPS?
5. ¿Estarían dispuestos a reemplazar el uso de EPS por una alternativa biodegradable?

Como se muestra, las preguntas están orientadas desde la premisa que los MMC son un posible remplazo para el uso de EPS en distintos rubros. Están orientadas también a identificar un "dolor" por parte de los actores, como parte de la metodología SPIN [89]. Se concluyó del análisis, como muestra la Figura 4.21, que los dos rubros con mejores prospectos de tener adoptadores tempranos fueron la jardinería y la construcción. Estudiar la posible demanda del material en la construcción es central para el éxito del proyecto. Los resultados presentados en la Tabla 4.40 fueron hechos con 2 o 3 entrevistados por rubro. Es necesario una mayor cantidad de entrevistados para tener información conclusiva.

Se define para el modelo de negocios que la empresa a evaluar produce materiales a partir de residuos agrícolas y que los MMC resultantes son vendidos a empresas constructoras. Por esto un aspecto clave es la formación de alianzas con constructoras que realicen la instalación del producto. Esto permite asegurar al cliente final las mejores condiciones de operación del material, lo que mejora las posibilidades de tener éxito en este mercado. Se presenta en el Anexo E el modelo de negocios según metodología *lean business model canvas* y los análisis de mercado FODA y fuerzas de Porter.

4.3.2. Costos de inversión

Los costos de inversión de cada alternativa son determinados a partir de cotizaciones de los equipos dimensionados. Estos representan los costos de la instalación de todo el sistema de producción necesario para poner en marcha el proyecto. Este costo es de especial relevancia al buscar financiamiento para el proyecto, ya que define el monto inicial de inversión necesario. Los costos adicionales a los equipos fueron definidos de forma relativa a la cotización de estos. Los porcentajes de distribución de los costos se basan en estándares de estimación ocupados para plantas de producción química [79].

CAPEX Proceso base

Tabla 4.41: Costos de inversión, caso base.

Costos directos	Valor [\$USD]	Porcentaje del CAPEX	Costos Indirectos	Valor [\$USD]	Porcentaje del CAPEX
Equipos	166.896	22 %	Ingeniería y supervisión	37.931	5 %
Instalación equipos	30.345	4 %	Gastos de construcción	37.931	5 %
Instrumentación y control	60.898	8 %	Honorarios de constratistas	37.931	5 %
Piping	37.931	5 %	Contingencia	37.931	5 %
Instalación eléctrica	53.103	7 %	Total	151.723	20 %
Construcciones	113.792	15 %			
Mejoras de terreno	22.758	3 %			
Instalación de servicios	22.578	3 %			
Terreno	98.620	13 %			
Total	606.893	80 %	CAPEX Total	758.616 [\$USD]	

CAPEX Alternativa 1: Pre-cultivo

Los costos de inversión de la primera alternativa son considerados iguales a los de el caso base dada la descripción del proceso, por lo que se omiten y se consideran iguales a los anteriores.

CAPEX Alternativa 2: Sustrato selectivo

Tabla 4.42: Costos de inversión, alternativa 2.

Costos directos	Valor [\$USD]	Porcentaje del CAPEX	Costos Indirectos	Valor [\$USD]	Porcentaje del CAPEX
Equipos	197.236	22 %	Ingeniería y supervisión	44.826	5 %
Instalación equipos	35.861	4 %	Gastos de construcción	44.826	5 %
Instrumentación y control	71.722	8 %	Honorarios de constnatistas	44.826	5 %
Piping	44.826	5 %	Contingencia	44.826	5 %
Instalación eléctrica	62.757	7 %	Total	179.305	20 %
Construcciones	134.479	15 %			
Mejoras de terreno	26.896	3 %	CAPEX Total	896.527 [\$USD]	
Instalación de servicios	26.896	3 %			
Terreno	116.548	13 %			
Total	717.222	80 %			

4.3.3. Costos de operación

Los costos de operación representan el gasto anual asociado a la producción de MMC en cada caso. Los costos de operación están estrechamente relacionados con la rentabilidad del proyecto ya que, de ser menores los ingresos por ventas anuales que estos costos, es imposible que el proyecto sea económicamente rentable. Las economías de escala permiten la reducción de los costos operacionales, muchas veces a cambio de un aumento en los costos de inversión. Otras estrategias se pueden emplear para la reducción de los costos operacionales como reducción de personal o cambios de material primas. Se presenta luego del OPEX del caso base una evaluación del efecto de cambiar el laboratorio de inóculo sólido, por uno de inóculo líquido, dado el alto peso que tiene el costo del grano utilizado para el inóculo sólido.

OPEX Caso base

Tabla 4.43: Dotación y consumos requeridos para la operación del caso base.

Descripción de cargo	Dotación			Consumibles	Consumibles y reactivos	
	Costo laboral anual [\$USD]	Cantidad	Total anual [\$USD]		Consumo anual [kg]	Costo anual [\$USD]
Jefe de operaciones	30.000	1	30.000	Yute	106.000	31.300
Ingeniero de gestión	25.000	1	25.000	Vidrio	1.330.000	19.640
Jefe de turno	16.000	2	32.000	Grano	1.060.000	280.000
Operador planta	12.000	10	120.000	Micelio	8	60
Operador laboratorio	12.000	4	48.000	Total		331.000
	Total	18	255.000			

Tabla 4.44: Costos operacionales caso base.

Costos fijos		Costos variables	
Descripción	Costo anual [USD]	Descripción	Costo anual [USD]
Mano de obra	255.000	Consumibles	331.000
Administración	25.500	Insumos	30.000
Total	280.500	Mantenición	20.000
		Total	381.000

OPEX total	661.500 [USD/año]
-------------------	--------------------------

El OPEX del caso base al cambiar desde un laboratorio de inóculo sólido por uno de producción de inóculo líquido, disminuye en un 38 %, desde 661.500 [USD/año] a 411.500 [USD/año]. La diferencia se debe principalmente al bajo costo de los insumos necesarios para la producción de los medios líquidos, como el medio de almidón y dextrosa. Para realizar este cambio el costo de inversión aumenta en un 77 %, desde 758.616 [USD] a 1.344.245 [USD]. Este alto aumento en el costo de inversión hace pensar que la disminución en OPEX no vale la pena, pero podría ser justificable en el escenario que se cuente con un capital inicial lo suficientemente grande. La exploración en detalle de esa alternativa queda abierta para una etapa más avanzada de evaluación. Al evaluarlo hay que tener en cuenta que el consumo de grano al año probablemente está sobre estimado ya que la proporción de inóculo en la mezcla es igual a la del método experimental, y puede que a mayor escala sea posible ocupar una menor proporción para inocular el sustrato.

OPEX Alternativa 1: Pre-cultivo

Tabla 4.45: Dotación y consumos requeridos para la operación de la primera alternativa.

Dotación				Consumibles y reactivos		
Descripción de cargo	Costo laboral anual [USD]	Cantidad	Total anual [USD]	Consumibles	Consumo anual [kg]	Costo anual [USD]
Jefe de operaciones	30.000	1	30.000	Yute	106.000	31.300
Ingeniero de gestión	25.000	1	25.000	Vidrio	1.330.000	19.640
Jefe de turno	16.000	2	32.000	Grano	1.060.000	280.000
Operador planta	12.000	10	120.000	Micelio	8	60
Operador laboratorio	12.000	6	72.000	Total		331.000
	Total	20	279.000			

Tabla 4.46: Costos operacionales alternativa 1.

Costos fijos		Costos variables	
Descripción	Costo anual [\$USD]	Descripción	Costo anual [\$USD]
Mano de obra	279.000	Consumibles	331.000
Administración	27.900	Insumos	30.000
Total	306.900	Mantenición	20.000
		Total	381.000

OPEX total	687.900 [\$USD/año]
-------------------	----------------------------

OPEX Alternativa 2: Sustrato selectivo

Tabla 4.47: Dotación y consumos requeridos para la operación de la segunda alternativa.

Dotación				Consumibles y reactivos		
Descripción de cargo	Costo laboral anual [\$USD]	Cantidad	Total anual [\$USD]	Consumibles	Consumo anual [kg]	Costo anual [\$USD]
Jefe de operaciones	30.000	1	30.000	Yute	106.000	31.300
Ingeniero de gestión	25.000	1	25.000	Vidrio	1.330.000	19.640
Jefe de turno	16.000	3	48.000	Grano	1.060.000	280.000
Operador planta	12.000	10	120.000	Micelio	8	60
Operador laboratorio	12.000	4	48.000	Yeso	19.000	3.800
Op. fermentación	12.000	2	24.000	NH ₄ NO ₃	128.000	44.800
Total		21	295.000	Total		379.600

Tabla 4.48: Costos operacionales alternativa 2.

Costos fijos		Costos variables	
Descripción	Costo anual [\$USD]	Descripción	Costo anual [\$USD]
Mano de obra	295.000	Consumibles	379.600
Administración	29.500	Insumos	30.000
Total	324.500	Mantenición	20.000
		Total	429.000

OPEX total	754.500 [\$USD/año]
-------------------	----------------------------

En cuanto a la estructura de costos de las alternativas, se observa que los CAPEX y OPEX de cada alternativa son similares, al no diferir en ordenes de magnitud y al encontrarse en rangos de precios cercanos. Esto no tiene ninguna implicación directa. Los componentes del CAPEX en todos los casos se distribuyen de igual manera, al estar distribuidos según estándares definidos en bibliografía [79]. En el caso del OPEX su distribución depende más directamente del modo de operación definido para cada alternativa. Por lo general los principales costos operacionales están asociados a la mano de obra y a la compra de grano cereal para el inóculo sólido. Como se discutió, el cambio a inóculo líquido podría significar una reducción de este costo, pero el aumento en costo de inversión asociado es muy grande. Podrían evaluarse alternativas de producción con medio líquido menos costosas.

4.3.4. Estudio de rentabilidad

Para el estudio de rentabilidad del proyecto se utiliza el VAN. Este indicador resume en valor actual, el resultado del flujo de caja de un proyecto a lo largo de un periodo definido. El flujo de caja depende principalmente del CAPEX, del OPEX y de las utilidades por ventas. Si el VAN es positivo, este indica que el flujo es mayor que un caso comparativo definido por la tasa de retorno. Por ejemplo, en esta memoria la tasa de retorno es del 20 %, por lo que de ser positivo el VAN, significa que la inversión (*i.e.* el pago de los costos de inversión y operación), es más rentable que utilizar ese mismo dinero en una inversión con un 20 % de retorno, a lo largo del mismo periodo, en valor actual.

Para la evaluación de este proyecto se utiliza además una prima de riesgo. Esta se incluye en el cálculo del VAN para reflejar la incertidumbre asociada al proyecto. La prima de riesgo se suma a la tasa de retorno, haciendo que en la práctica el caso comparativo definido para el proyecto sea más exigente. Con esto se busca que un VAN positivo indique realmente si la inversión en el proyecto vale más que un retorno del 20 % asegurado, considerando la posibilidad de un fin por quiebra u otros motivos. En este caso, la incertidumbre surge principalmente de dos factores, los flujos operacionales y el nivel de avance en la evaluación. La presente evaluación se encuentra en la etapa de ingeniería de perfiles, que es la primera en las etapas de evaluación de un proyecto. Por lo que la inversión en esta etapa significa un gran riesgo al no estar toda la información disponible para tomar la decisión. La incertidumbre en flujos resulta de que no existe una operación en marcha actualmente, todo tiene que ser coordinado aún, haciendo que sea muy alta la posibilidad de que existan problemas imprevisibles.

Así los indicadores de rentabilidad mostrados a continuación están hechos en base una tasa de retorno del 20 %, sumada a una prima de riesgo del 20 %. Los valores de estos dos parámetros suelen ser definidos en base a la experiencia del evaluador y las condiciones de mercado, se discutió para esta memoria con distintos actores que han trabajado en consultoras evaluadoras de proyecto, resultando en estos valores y en las justificaciones presentadas en la Tabla 4.39. Se utiliza además un precio de venta igual al del EPS por [m³], que resulta ser de los productos de aislación más económicos del mercado. Por estos factores la evaluación de rentabilidad del caso base y las alternativas es altamente exigente, lo que es responsable en el escenario de evaluación actual. Luego, en la sección de análisis de sensibilidad, se evalúan distintos escenarios en los que el proyecto se podría encontrar, que resultan en distintas evaluaciones de rentabilidad.

VAN Caso base

Tabla 4.49: Flujo de caja y VAN caso base en [\$USD].

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	618.675	618.675	...	618.675	618.675	618.675
OPEX	-	-661.500	-661.500	...	-661.500	-661.500	-661.500
Flujo de capital (+)	-	-	-	...	-	-	16.690
Depreciación (-)	-	-8.345	-8.345	...	-8.345	-8.345	-8.345
Pérdida ejercicio anterior (-)	-	0	-51.170	...	-358.189	-409.359	-460.529
Utilidad antes de impuesto	0	-51.170	-102.340	...	-409.359	-460.529	-495.009
Impuesto (27%)	-	0	0	...	0	0	0
Utilidad después de impuesto	0	-51.170	-102.340	...	-409.359	-460.529	-495.009
Depreciación (+)	-	8.345	8.345	...	8.345	8.345	8.345
Flujo de capital (-)	-	-	-	...	-	-	-16.690
Pérdida ejercicio anterior (+)	-	0	51.170	...	358.189	409.359	460.529
Flujo caja operacional	0	-42.825	-42.825	...	-42.825	-42.825	-42.825
Flujo de capitales	-1.068.128	144.137	0	...	0	0	265.512
Flujo de caja neto	-1.068.128	101.312	-42.825	...	-42.825	-42.825	222.687
VAN anual	-1.068.128	72.366	-21.850	...	-2.902	-2.073	7.699
VAN [\$USD]	-1.059.355						

VAN Alternativa 1: Pre-cultivo

Tabla 4.50: Flujo de caja y VAN alternativa 1 en [\$USD].

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	618.675	618.675	...	618.675	618.675	618.675
OPEX	-	-687.900	-687.900	...	-687.900	-687.900	-687.900
Flujo de capital (+)	-	-	-	...	-	-	16.690
Depreciación (-)	-	-8.345	-8.345	...	-8.345	-8.345	-8.345
Pérdida ejercicio anterior (-)	-	0	-77.570	...	-542.989	-620.559	-698.129
Utilidad antes de impuesto	0	-77.570	-155.140	...	-620.559	-698.129	-795.009
Impuesto (27%)	-	0	0	...	0	0	0
Utilidad después de impuesto	0	-77.570	-155.140	...	-620.559	-698.129	-795.009
Depreciación (+)	-	8.345	8.345	...	8.345	8.345	8.345
Flujo de capital (-)	-	-	-	...	-	-	-16.690
Pérdida ejercicio anterior (+)	-	0	77.570	...	542.989	620.559	698.129
Flujo caja operacional	0	-69.225	-69.225	...	-69.225	-69.225	-69.225
Flujo de capitales	-1.074.728	144.137	0	...	0	0	272.112
Flujo de caja neto	-1.074.728	74.912	-69.225	...	-69.225	-69.225	202.887
VAN anual	-1.074.728	53.509	-35.319	...	-4.691	-3.351	7.014
VAN [\$USD]	-1.129.445						

VAN Alternativa 2: Sustrato selectivo

Tabla 4.51: Flujo de caja y VAN alternativa 2 en [\$USD].

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	618.675	618.675	...	618.675	618.675	618.675
OPEX	-	-754.500	-754.500	...	-754.500	-754.500	-754.500
Flujo de capital (+)	-	-	-	...	-	-	33.379
Depreciación (-)	-	-9.862	-9.862	...	-9.862	-9.862	-9.862
Pérdida ejercicio anterior (-)	-	0	-144.170	...	-1.019.808	-1.165.495	-1.311.182
Utilidad antes de impuesto	0	-145.687	-291.374	...	-1.165.495	-1.311.182	-1.423.489
Impuesto (27 %)	-	0	0	...	0	0	0
Utilidad después de impuesto	0	-145.687	-291.374	...	-1.165.495	-1.311.182	-1.423.489
Depreciación (+)	-	9.862	9.862	...	9.862	9.862	9.862
Flujo de capital (-)	-	-	-	...	-	-	-33.379
Pérdida ejercicio anterior (+)	-	0	145.687	...	1.019.808	1.165.495	1.311.182
Flujo caja operacional	0	-135.825	-135.825	...	-135.825	-135.825	-135.825
Flujo de capitales	-1.255.492	170.340	0	...	0	0	388.900
Flujo de caja neto	-1.255.492	34.515	-135.825	...	-135.825	-135.825	253.075
VAN anual	-1.255.492	24.654	-69.299	...	-9.204	-6.574	8.749
VAN [\$USD]		-1.448.199					

Se observa en los tres casos que el VAN calculado es negativo. Dado que para los tres casos el ingreso por ventas es el mismo (mismo precio de venta y producción) se esperaba que el caso más rentable fuera el con menos costos (*i.e.* el caso base). Esto en efecto fue así, pero además resultó que en ninguno de los casos el ingreso por ventas fue mayor que los costos operacionales. Esto significa que el costo de producir una unidad es mayor que el ingreso generado por esta. Este escenario puede significar que la producción de MMC según el método planteado en la presente memoria no es rentable, principalmente por tener costos operacionales muy elevados. Otra explicación a este fenómeno puede ser que el precio de venta no es el correcto para el producto. El precio en un escenario real se define por la interacción entre la oferta y la demanda del producto, pero en este caso fue definido a través de un supuesto que lo iguala al precio del EPS, un sustituto directo del MMC en el mercado. Mantener precios similares a los de la competencia mejora la posibilidad de tener éxito en un mercado competitivo, lo ideal sería poder vender el producto a un precio menor, pero dado el resultado de la rentabilidad se evalúa en el análisis de sensibilidad a continuación el aumento del precio de venta.

Se determina que el OPEX es la principal razón por la que el VAN es negativo en los tres casos. Los factores que elevan el OPEX son los consumibles y la mano de obra. Para el caso de la mano de obra, los puestos definidos se consideran necesarios según la descripción del proceso de operación, por lo que la opción de contratar menos gente no se considera factible. Reducir los sueldos es una opción, pero no es de interés quitarle ganancias a las personas que se involucren en el desarrollo del proyecto. Aún así un ajuste se podría realizar en este aspecto al avanzar en las etapas de evaluación. En cuanto a los consumibles el principal costo se asocia al grano. Como se discutió en la determinación del OPEX, el uso de inóculo líquido reduce aproximadamente en un 38 % los costos operacionales, pero a cambio de un aumento del 77 % en los costos de inversión. Conseguir mejores precios de compra de grano o lograr reducir su consumo significaría una mejor posibilidad de obtener un VAN positivo. En resumen el OPEX es la principal causa de tener un VAN negativo siendo la mano de obra

un 35 % de este costo, y el grano un 42 %, considerando el caso base como referencia.

4.3.5. Análisis de sensibilidad

El objetivo del análisis de sensibilidad es observar el comportamiento de los indicadores económicos del proyecto en distintos escenarios. Como se mencionó anteriormente, el primer escenario está enfocado en evaluar el precio de venta de los MMC para que el proyecto empiece a ser rentable. Para este escenario entonces se define como supuesto que los MMC producidos se venden en su totalidad independiente del precio. Este supuesto es muy débil ya que el mercado en el que se encuentra el producto es uno altamente competitivo, lo que hace a la demanda muy elástica al precio. Aún así es un escenario posible ya que los compradores suelen estar dispuestos a pagar más por productos que sean congruentes con sus intereses. Como se mencionó en el marco teórico, el desarrollo de aislantes sustentables está impulsado en parte por las decisiones de consumidores, lo que refleja el interés por optar por opciones como los MMC.

4.3.5.1. Ajuste precio de venta

El cálculo realizado en este escenario corresponde a determinar el precio de venta necesario para que cada caso tenga un VAN igual a 0 [\$USD]. Esto manteniendo la tasa de retorno, la prima de riesgo, y la estructura de costos utilizada anteriormente. Un VAN igual a 0 [\$USD] significa entonces que se espera que el retorno de la inversión al final del periodo de evaluación, llevado a valor actual, sea igual a la suma de la tasa de descuento y la prima de riesgo, en este caso un 40 %. Se muestra en cada caso el precio necesario para que este escenario ocurra, considerar que el precio de venta original es de 325 [\$USD/ton].

Caso Base

Tabla 4.52: Flujo de caja y VAN caso base [\$USD], precio de venta 1,94 veces el definido inicialmente

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	1.201.093	1.201.093	...	1.201.093	1.201.093	1.201.093
OPEX	-	-661.500	-661.500	...	-661.500	-661.500	-661.500
Utilidad antes de impuesto	0	531.248	531.248	...	531.248	531.248	547.937
Impuesto (27 %)	-	-143.437	-143.437	...	-143.437	-143.437	-147.943
Utilidad después de impuesto	0	387.811	387.811	...	387.811	387.811	399.994
Flujo de caja neto	-1.068.128	540.293	396.156	...	396.156	396.156	657.162
VAN anual	-1.068.128	385.923	202.120	...	26.844	19.174	22.719
Precio de venta [\$USD/ton]	631						
VAN [\$USD]	0						

Alternativa 1: Pre-cultivo

Tabla 4.53: Flujo de caja y VAN alternativa 1 [\$USD], precio de venta 1,99 veces el definido inicialmente.

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	1.231.109	1.231.109	...	1.231.109	1.231.109	1.231.109
OPEX	-	-687.900	-687.900	...	-687.900	-687.900	-687.900
Utilidad antes de impuesto	0	534.864	534.864	...	534.864	534.864	551.554
Impuesto (27%)	-	-144.431	-144.431	...	-144.431	-144.431	-148.920
Utilidad después de impuesto	0	390.451	390.451	...	390.451	390.451	402.634
Flujo de caja neto	-1.074.728	542.933	398.796	...	398.796	398.796	666.402
VAN anual	-1.074.728	387.809	203.467	...	27.023	19.302	23.039
Precio de venta [\$USD/ton]	647						
VAN [\$USD]	0						

Alternativa 2: Sustrato selectivo

Tabla 4.54: Flujo de caja y VAN alternativa 2 [\$USD], precio de venta 2,24 veces el definido inicialmente.

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	1.386.198	1.386.198	...	1.386.198	1.386.198	1.386.198
OPEX	-	-754.500	-754.500	...	-754.500	-754.500	-754.500
Utilidad antes de impuesto	0	622.556	622.556	...	622.556	622.556	655.935
Impuesto (27%)	-	-168.090	-168.090	...	-168.090	-168.090	-177.102
Utilidad después de impuesto	0	454.466	454.466	...	454.466	454.466	478.832
Flujo de caja neto	-1.255.492	634.668	464.327	...	464.327	464.327	844.215
VAN anual	-1.255.492	543.334	236.902	...	31.463	22.474	29.186
Precio de venta [\$USD/ton]	729						
VAN [\$USD]	0						

Al ver los coeficientes por los cuales el precio de venta debe ser aumentado para llegar al caso del VAN igual a 0 [\$USD] se puede comentar sobre la factibilidad de la venta del material en estos casos. El factor de multiplicación del precio de venta se encuentra entre 1,9 y 2,3 para llegar a la condición definida. La condición, como se mencionó al explicar el VAN, es bastante exigente, y de cumplirse resulta ser un escenario lo suficientemente rentable como para compensar el incertidumbre del proyecto sumado a la rentabilidad esperada de este. Por lo tanto, de cumplirse el supuesto de que a estos precios el material se vende en su totalidad, se tendría que es suficientemente rentable el proyecto como para llevarse a cabo. En la construcción, los presupuestos para las edificaciones suelen ser muy variados. En cierto tipo de proyectos, como grandes obras públicas o privadas, los presupuestos son muy altos, y a veces puede que estén dispuestos a gastar más por hacer su edificio más sustentable. Pero en la mayoría de los casos los consumidores buscan minimizar sus costos, por lo que pagar el doble por aislación parece un escenario poco posible.

4.3.5.2. Tasa interna de retorno

Para esta parte del análisis se busca identificar la rentabilidad máxima del proyecto dado un nuevo precio para el material. Para el caso base y las dos alternativas se define arbitrariamente un precio 1,5 veces mayor al original, igual a 488 [USD/ton], recordando que el precio original es igual al precio volumétrico del EPS para aislación. Se define como supuesto que el precio es aún competitivo en el mercado después del aumento. El cálculo que se realiza es un ajuste de la tasa de retorno para que el VAN sea cero, este ajuste es conocido como tasa interna de retorno (TIR). El valor del TIR indica cual es la máxima rentabilidad que puede llegar a tener un proyecto. Dados los resultados previos, el TIR no será mayor al 40 % que define la tasa de descuento sumada a la prima de riesgo, lo que hace al proyecto según ese nivel de exigencia no recomendable para la inversión. Aún así, de ser positivo el TIR significa que al llevarse a cabo el proyecto en el escenario planteado, se podría llegar a tener una rentabilidad positiva de a lo más un porcentaje igual al TIR sobre la inversión.

Caso base

Tabla 4.55: TIR caso base, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	928.422	928.422	...	928.422	928.422	928.422
OPEX	-	-661.500	-661.500	...	-661.500	-661.500	-661.500
Utilidad después de impuesto	0	188.761	188.761	...	188.761	188.761	200.945
Flujo de caja neto	-1.068.128	341.243	197.106	...	197.106	197.106	458.112
VAN anual	-1.068.128	289.872	142.228	...	53.436	45.392	89.617
VAN [USD]	0						
TIR	17,72 %						

Alternativa 1

Tabla 4.56: TIR alternativa 1, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	928.422	928.422	...	928.422	928.422	928.422
OPEX	-	-687.900	-687.900	...	-687.900	-687.900	-687.900
Utilidad después de impuesto	0	169.489	169.489	...	169.489	169.489	181.673
Flujo de caja neto	-1.074.728	321.971	177.834	...	177.834	177.834	445.440
VAN anual	-1.074.728	279.420	133.935	...	57.219	49.657	107.943
VAN [USD]	0						
TIR	15,23 %						

Alternativa 2

Tabla 4.57: TIR alternativa 2, con precio de venta 1,5 veces el definido inicialmente.

Factores	Año						
	0	1	2	...	8	9	10
Ingresos por ventas	-	928.422	928.422	...	928.422	928.422	928.422
OPEX	-	-754.500	-754.500	...	-754.500	-754.500	-754.500
Utilidad después de impuesto	0	119.764	119.764	...	119.764	119.764	144.131
Flujo de caja neto	-1.255.492	299.966	129.626	...	129.626	129.626	509.513
VAN anual	-1.255.492	280.032	112.970	...	74.779	69.810	256.164
VAN [\$USD]	0						
TIR	7,12 %						

Como ha sido el caso con el análisis económico inicial de las alternativas, el caso base presenta ventajas económicas sobre las alternativas por tener menores costos. La segunda alternativa tuvo el peor rendimiento por la misma razón, y en este caso fue especialmente significativo. La diferencia de la tasa interna de retorno (TIR) del caso base con la primera alternativa es de 2,5 % aproximadamente. En cambio la diferencia entre la alternativa uno y la dos es de 8 %, siendo esta última menor que la mitad de la TIR del caso base. Esto refleja como la alternativa 2 es menos viable financieramente a esta escala de producción. El sistema de producción de sustrato selectivo se utiliza en la actualidad en las plantas productoras de champiñones, que procesan un volumen mucho mayor de sustrato del que se evaluó en esta memoria. Este sistema reduce los costos operacionales de tener que trabajar en condiciones estériles con el sustrato, pero al igual que en el caso del laboratorio líquido, significa un aumento en los costos de inversión. Tal vez el sistema propuesto en la alternativa 2 se justifica a mayores escalas de producción. Una alternativa para optar a las ventajas operacionales de esta opción sin tener que incurrir en un aumento de CAPEX y OPEX tan significativo puede ser externalizar el proceso de fermentación del sustrato, y comprar este fermentado a industrias que ya la produzcan (como las champiñoneras).

Comparar los resultados de la TIR obtenidos en este escenario con la exigencia inicial de rentabilidad nos permite evaluar lo siguiente. Las TIR positivas obtenidas en este caso significan que se podría obtener una rentabilidad al llevar a cabo el proyecto y vender los materiales al precio establecido de 488 [\$USD/ton]. Pero el cálculo del VAN se realizó en primer lugar con la tasa de retorno y la prima de riesgo sumada de 40 % porque representan la exigencia real que tienen los inversionistas en torno a este tipo de proyectos. Al ser la TIR de los tres casos menor al 40 % significa que llevar a cabo el proyecto es una decisión arriesgada, y con este nivel de desarrollo probablemente no se logre conseguir financiamiento. Se recomienda entonces iterar sobre el proceso de producción, teniendo en cuenta las limitaciones económicas que se presentaron respecto a los costos de operación y precio de venta. Es una posibilidad también de pivotar a la producción de un nuevo producto en el caso de encontrar algún mercado que parezca más rentable.

Capítulo 5

Conclusiones

La evaluación técnico económica del proyecto presentada en esta memoria logra generar un análisis a nivel de ingeniería de perfiles, que define una serie de aspectos básicos del proyecto, pero al mismo tiempo necesita más profundidad para permitir tomar decisiones en torno a su implementación. Partiendo por la etapa experimental, esta sirve como una prueba de concepto de que el proceso planteado tiene la capacidad de producir materiales aislantes hechos de micelio. El problema que este tiene es que su escalabilidad no está asegurada debido a el aumento de variables en el escenario de producción industrial. Aspectos como el tamaño del molde, la cantidad de sustrato, los equipos utilizados, las condiciones de operación, entre otras, significan un potencial cambio en los resultados obtenidos experimentalmente. Aún así estos resultados sirvieron como base para realizar este primer acercamiento a la producción de MMC a escala industrial. Sigue siendo de extrema importancia la medición de propiedades de aislación térmica y de resistencia mecánica del material para poder comprobar el supuesto de que el material tiene la capacidad de ser utilizado como aislante en la construcción.

En el diseño del proceso realizado en la evaluación técnica, tanto las bases de diseño como la escala de producción se plantean en un nivel de profundidad bajo. Dada la relevancia de estos aspectos es necesario tener en perspectiva la limitación de los resultados generados a partir de estas definiciones. La escala de producción es un supuesto que podría haberse definido a una escala totalmente distinta, como por ejemplo al 1 % de la demanda de EPS en América del Sur. Un cambio de escala como esta podría haberse traducido luego a un mejor comportamiento del proyecto en cuanto a rentabilidad, dada la reducción de costos unitarios que se dan a mayores escalas. Este fenómeno de economías de escala difícilmente podría ser reflejado en esta evaluación ya que los parámetros utilizados para calcular los balances de masa y dimensionamiento de los equipos se basa en una producción a la escala más pequeña posible. Datos de los costos de operación y de inversión de una planta piloto podrían servir para estimar el efecto del aumento de escala, por ahora el análisis económico presentado en esta memoria puede servir como base también para siguientes iteraciones de la evaluación, siendo necesario identificar aún los puntos donde se generan las diferencias entre los parámetros de la escala industrial y la de laboratorio.

Las bases de diseño utilizadas se definieron de forma muy holgada, y aún así no está asegurado su cumplimiento con el diseño del proceso propuesto. Los parámetros de densidad y conductividad definidos en las bases deberían cumplirse considerando que las publicaciones revisadas obtuvieron en su mayoría valores dentro de estos rangos. Aún así no se comprueba

en esta memoria que el proceso pueda generar materiales de la conductividad térmica deseada. De forma más crítica aún, la capacidad de producción tampoco se ha comprobado con el desarrollo de la memoria. El supuesto de que se alcanza el volumen de producción deseado se basa en que el proceso se lleva a cabo según su descripción, pero existen consideraciones relevantes que hay que tener en cuenta antes de poder afirmar esto. Primero, la obtención de la materia prima no ha sido asegurada al no existir contacto con productores que generen los residuos considerados para la producción, se espera que estos se puedan obtener dado el contexto de actividades económicas en Chile, pero la gestión de su obtención puede presentar más complicaciones de las que se prevén. Segundo, existen ciertos puntos débiles, como se discutió en la evaluación técnica de las alternativas, que pueden generar fallas en el proceso y por lo tanto un detenimiento de la producción. Los dos puntos identificados relacionados a la esterilidad y a la trituración del sustrato probablemente no sean los únicos puntos débiles y es muy posible que en el escenario de una puesta en marcha del proceso, se encuentren más imprevistos que los mencionados.

Las alternativas de procesamiento presentadas aportan al desarrollo del proceso de producción de MMC, al introducir nuevos procesos unitarios no reportados en literatura. La primera alternativa utiliza un concepto comúnmente usado en los cultivos de micro organismos y en fermentaciones. Por esto no se considera un aspecto muy innovador, pero su efecto sobre el tiempo de cultivo tampoco ha sido demostrado en literatura. La segunda alternativa de procesamiento presenta una idea de producción innovadora al reemplazar el uso de sustrato esterilizado de forma convencional, por el uso de sustrato selectivo, un principio que se ha utilizado en la producción de setas comestibles, pero que no se ha implementado en la producción de materiales de micelio. Existen aún así complicaciones en la implementación de este último proceso, ya que no se ha comprobado la capacidad de fermentar sustratos como la poda de viña. Esto significa entonces que la elección de sustrato o la incorporación de este proceso unitario está condicionado al cumplimiento de este supuesto. Podría ser una alternativa para financiar este proceso a escala industrial, la adquisición de una planta productora de champiñones ya establecida, de esa forma es posible que la incertidumbre del proyecto, y posiblemente también sus costos de inversión se vean disminuidos.

Los indicadores económicos del proyecto dependen del dimensionamiento de los equipos realizado y de las dotaciones de personal definidas, las cuales aún deben ser definidas con más criterio. Las cotizaciones, tanto de los equipos principales como secundarios, se basan en guías de precios poco específicas. En su mayoría las especificaciones exactas de los equipos requeridos por diseño no se encontraron, por lo que se optó por evaluar el uso de equipos similares, esto genera que los precios obtenidos tengan una desviación de los precios reales que se podrían obtener al implementar finalmente el proyecto. No está claro si los costos de inversión y de operación están sobre o sub estimados, lo que genera que haya menor confianza en los resultados obtenidos. Aún así estos parámetros se definieron tratando de emular lo más posible el caso real, por lo que se considera útil dentro del alcance de esta memoria.

La calificación realizada de los parámetros técnicos de evaluación son un reflejo de la apreciación personal del autor sobre distintos puntos relevantes para la realización de este proyecto. Al estar los seis puntos de evaluación (*i.e.* riesgo de negocio, factibilidad, operatividad, mantenibilidad, riesgos ambientales, y seguridad y salud ocupacional) divididos en cuatro sub-criterios, se espera que el sesgo disminuya, al tener que justificar cada una de

las calificaciones de los sub-criterios por separado. Aún así, estos resultados están sujetos a discusión y se invita a hacer nuevamente el ejercicio de evaluar según estos criterios el proyecto planteado u otros similares. De todas formas se espera que la evaluación defina como el aspecto más positivo el riesgo ambiental, y como el más negativo el riesgo de negocio. Uno de los principales aspectos a superar antes de lograr la implementación exitosa del proyecto es reducir la incertidumbre. La presente memoria avanza en este sentido por ejemplo al esclarecer los requisitos definidos por las normas y leyes chilenas sobre los materiales aislantes. La determinación de los grosores mínimos de MMC instalados según zona térmica también ayudan a esclarecer la capacidad del material de competir como aislante en la construcción.

En cuanto a la evaluación económica del proyecto, la principal conclusión es respecto al costo de operación, que en los tres casos evaluados fue mayor que los ingresos por ventas. Se espera que en la implementación de un nuevo proceso, nuevos desarrollos tecnológicos en torno a este permitan reducir sus costos operacionales gradualmente. A raíz de esto se considera que el proyecto planteado es uno de alto riesgo pero a la vez uno de alto potencial. El nivel de desarrollo tecnológico actual al ser bajo genera que la incerteza del método de producción y los costos operacionales aumenten. Existe entonces la posibilidad de crear nuevas soluciones tecnológicas que sean patentables, dándole una ventaja competitiva a los primeros inversionistas que se aventuren en este campo. Hay que considerar el alcance de esta conclusión, al estar basada en una evaluación económica construida en base a todas las fuentes de incertidumbre planteadas anteriormente. El indicador de rentabilidad negativo en los tres casos refleja el poco desarrollo que existe al rededor de este proceso. Los costos de las materias primas, de mano de obra, y de inversión en equipos son las principales razones por las cuales no se supera el nivel de rentabilidad exigido para este proyecto. Estos tres aspectos aún pueden ser trabajados y explorados en más detalle para lograr reducir sus costos y llegar a un escenario de inversión atractivo. En principio el proyecto tiene materias primas de bajo costo y un proceso simple y de bajo consumo energético, esto indica de forma general que el proyecto debería poder realizarse de forma rentable, al lograr valorar residuos a través de un proceso de bajo costo.

Los escenarios planteados en el análisis de sensibilidad fueron escogidos para reflejar el potencial que tiene el proyecto, estableciendo puntos necesarios, que en principio no son tan alejados de la realidad, para que el proyecto tenga un atractivo económico. La motivación detrás del proyecto sigue siendo impulsar soluciones sostenibles a actividades humanas necesarias, que hoy en día son contaminantes. La aplicación del reino Fungi en los procesos productivos no había sido considerada anteriormente en la historia de la humanidad, a parte de casos como el de la levadura para fermentación o las setas para producción de alimento. La lógica de descomposición ha estado siempre muy alejada de los sistemas de producción humanos. En mi perspectiva la fijación con procesos generativos y la falta de procesos degenerativos ha generado en parte el desequilibrio que hoy nos pone en tensión con nuestro entorno. La implementación de formas de generar valor a través de la degradación no es una tarea fácil, hasta parece contra intuitivo, por eso el ejercicio de desarrollar proyectos como este no son solo una oportunidad de generar nuevos productos, si no que también nos permiten empezar a explorar una nueva forma de generar valor para los humanos que antes no había sido explorada.

Capítulo 6

Recomendaciones

El desarrollo de los materiales de micelios no solo está sujeto a la evaluación de proyectos como se hizo en esta memoria. Se recomiendan a continuación algunas líneas de investigación que puedan ser de interés para otros estudiantes o investigadores.

En el campo de la micología, el estudio del metabolismo de los hongos, de las composiciones bioquímicas de sus componentes y estructuras, propiedades como la hidrofobicidad, resistencia bacteriana o capacidad de degradación de distintos residuos puede ser de interés para estudiar. Estos aspectos tienen distintas relaciones a los materiales de micelio y su investigación puede abrir nuevas aplicaciones para los organismos Fungi.

Para efectos del desarrollo del material podría ser de interés estudiar la correlación entre genética y fenotipo de especies, y su relación con las propiedades materiales. O la evaluación de nuevas especies como biomasa para la generación de materiales. Es necesario también buscar estandarizar los métodos de prueba de propiedades relevantes de los materiales, y definir las proporciones de mezcla óptimas de sustrato y biomasa para obtener las propiedades materiales deseadas.

Por último en cuanto a la evaluación del proyecto se recomienda identificar distintas fuentes de incertidumbre, mencionadas en esta memoria, para profundizar y darle más robustez al proyecto. El diseño de una planta piloto y su posible puesta en marcha ayudaría mucho a hacer más probable la implementación de la producción de estos materiales. Se recomienda fuertemente buscar apoyo en las redes de personas interesadas en el reino Fungi, en Chile existen varios grupos que ya han dedicado tiempo a investigar y a desarrollar conocimiento sobre el reino Fungi.

Bibliografía

- [1] B. ROBERTS, M. WEBBER, O. EZEKOYE. 2015. Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs. *Energy and Buildings* volumen 105, 358-367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.063>
- [2] J. LEE, J. KIM D. SONG, C. JANG. 2016. Impact of external insulation and internal thermal density upon energy consumption of buildings in a temperate climate with distinct seasons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volumen 75, 1081-1088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.087>
- [3] Y.TSAO. 2020. Characterization of mycelium based composites as foam-like wall insulation material. Tesis de Magister. Holanda. Eindhoven University of Technology. Faculty of Architecture, Building and Planning.
- [4] FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Building thermal insulation market size, share & Covid impact analysis. 2020. [En línea] <https://www.fortunebusinessinsights.com/building-thermal-insulation-market-102708> [consulta: 12/01/2022]
- [5] IPCC, V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, A. PIRANI, S.L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, Et al. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- [6] S. MAHMOUD, T. ZAYED, M. FAHMY. 2019. Development of a sustainability assessment tool for existing buildings. *Sustainable Cities and Society* Volumen 44, 99-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.024>
- [7] M. PALOMO CARO. 2017. Aislante Térmicos, Criterios de Selección Por Requisitos Energéticos. Trabajo Fin de Grado. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- [8] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2021. Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. Oficina de Cambio Climático. Santiago, Chile.
- [9] M. BLENDER. 23 de abril de 2015. Aislantes Sustentables [Charla]. Cámara Chilena de la Construcción (CChC), Osorno, Chile.
- [10] M. PALUMBO, A. LACASTA, N. HOLCROFT, A. SHEA. 2016. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. *Construction and Building Materials* Volumen 124, 269-275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106>
- [11] M. JONES, A. MAUTNER, S. LUENCO, A. BISMARCK, S. JOHN. 2019. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review.

- Material and Design* Volumen 187, 108397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- [12] F. HEISEL, D. HEBEL. 2019. Pioneering construction materials through prototypical research. *Biomimetics* Volumen 4(3). doi: <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics4030056>
- [13] M. JONES, H. CHUN, R. YUEN, S. JOHN. 2018. Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Wiley* Volumen 42, 816-825. doi: <https://doi.org/10.1002/fam.2637>
- [14] C. GIROMETTA, A. PICCO, R. BAIGUERA, D. DONDI, S. BADDINI, M. CARTABIA, Et al. 2019. Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability* Volumen 11, 281. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su11010281>
- [15] E. ELSACKER, S. VANDELOOK, S. VAN WYLUCK, J. RUYTINX, L. DE LAET, E. PEETERS. 2020. A comprehensive framework for the mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of the Total Environment* Volumen 725, 138431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>
- [16] C. LULL, H. WICHERS, H. SAVELKOUL. 2005. Antiinflammatory and Immunomodulating properties of fungal metabolites. *Mediators of Inflammation* Volumen 2005:2, 63-80. doi: <https://doi.org/10.1155/mi.2005.63>
- [17] M. LENADRON, C. MUNRO, N. GOW. 2010. Chitin synthesis and fungal pathogenesis. *Current Opinion in Microbiology* Volumen 13, 416-423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2010.05.002>
- [18] P. STAMETS. Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save the World. Nueva York. *Ten Speed Press*. 2005.
- [19] N. FERNÁNDEZ. 2020. Materiales biopoliméricos desarrollados a partir de micelio y residuos lingocelulósicos. Estado de la técnica actual y perspectivas de aplicación en el campo del hábitat. *Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN* Volumen 5. doi: <https://doi.org/10.33414/ajea.5.774.2020>
- [20] O. SOTO, G. SAUCEDO, J. PABLOS, M. GUTIERREZ, E. FAVELA. (1999) Effect of substrate composition on the mycelial growth of *Plerotus ostreatus*. An analysis by mixture and response surface methodologies. *Process Biochemistry* Volumen 35, 127-133. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00043-6)
- [21] A. HATAKKA, E. HAMMEL. 2010. Fungal biodegradation of lignocelluloses. *The Mycota* Volumen 10, 319-340. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11458-8_15
- [22] T. SOUZA, C. MERRITT, C. REDDY. 1999. Lignin-modifying enzymes of the white rot Basidiomycete *Genoderma lucidum*. *Applied Environmental microbiology* Volumen 65, 5307-5313. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.65.12.5307-5313.1999>
- [23] F. APPELS, S. CAMERE, M. MONTALTI, E. KARANA, K. JANSEN, J. DIJKSTERHUIS, Et al. 2018. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design* Volumen 161, 64 - 71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- [24] A. ZIEGLER, S. BAJWA, G. HOLT, G. MCINTYRE, D. BAJWA. 2016. Evaluation

- of physico-mechanical properties of mycelium reinforced green biocomposties made from cellulosic fibers. *Applied Engineering in Agriculture*. Volumen 32(6), 931-938. doi: <http://dx.doi.org/10.13031/aea.32.11830>
- [25] E. ELSACKER, S. VADELOOK, J. BRANCART, E. PEETERS, L. DE LAET. 2019. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS ONE* Volumen 14(7), e0213954. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>
- [26] A. PAPADOPOULOS. 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*. Volumen 37, 77-86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- [27] N. ATTIAS, O. DANAI, E. TARAZI, I. PEREMAN, Y. GROBMAN. 2019. Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *Design Journal*. Volumen 22(1), 1647-1657. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14606925.2019.1594997>
- [28] L. YANG, D. PARK, Z. QIN. 2021. Material function of mycelium-based bio-composite: A review. *Frontiers in Materials*. Volumen 30 de septiembre 2021. doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.737377>
- [29] N. SULONG, S. MUSTAPA, M. RASHID, Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and construction: A review. 2019. *Journal of Applied Polymer Science* Volumen 47529, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- [30] K. CERIMI, K. AKKAYA, C. POHL, B. SCHMIDT, P. NEUBAUER. 2019. Fungi as a source of new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biology and Biotechnology* Volumen 6(17). doi: <https://fungalbiolbiotech.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40694-019-0080-y>
- [31] H. RITCHIE, M. ROSER. 2020. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. [En línea] <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> [consulta: 12/12/2021]
- [32] STATISTA. Market value of expanded polystyrene (EPS) worldwide in 2020 to 2028. [En línea] <https://www.statista.com/statistics/942737/expanded-polystyrene-global-market-value/> [consulta: 15/12/2021]
- [33] ASTM 578. 2004. Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation boards. *ASTM International Standard*. doi:<http://dx.doi.org/10.1520/C0578-22>
- [34] D. KUMAR, M. ALAM, P. ZOU, J. SANJAYANG, R. AHMED. 2020. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volumen 131, 110038. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- [35] CERESENA. 2019. Insulation Material Market Report - World. [En línea] <https://www.ceresana.com/en/market-studies/industry/insulation-material-world/>
- [36] O. EDELENBOSCH, D. ROVELLI, A. LEVESQUE, G. MARANGONI, M. TAVONI. 2021. Long term cross-country effects of building unsulation policies. *Technological Forecasting & Social Change* Vol 120, 120887. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120887>
- [37] M. JONES, T. HUYNHM C. DEKIWADIA, F. DAVE, S. JOHN. 2017. Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. *Journal of Bionanoscience* Volumen 11, 241-257. doi: <http://dx.doi.org/10.1166/jbns.2017.1440>

- [38] E. KARANA, D. BLAUWHOFF, E. HULTINK, S. CAMERE. 2018. When the materials grow: A case study on deigning with mycelium-based materials. *International Journal of Design* Volumen 12(2), 119-137. doi: <http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/2918>
- [39] S. SCHIAVONI, F. ALESSANDRO, F. BIANCHI, F. ASDRUBALI. 2016. Insulation materials for the building sector : A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volumen 62, 988-1011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- [40] D. LYN, S. NALEWAY. 2022. Hyphal systems and their effect on the mechanical properties of fungal sporocarps. *Acta Biomater* Volumen 145, 272-282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.04.011>
- [41] J. LIANG, D. WALCZYK, G. MCINTYRE, W. KIN. 2016. Cost modelling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based biocomposite parts. *Journal of Manufacturing Systems* Volumen 48, 8-20. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.07.004>
- [42] M. JONES, T. HUYNH S. JOHN. 2018. Inherit species characteristics influence and growth performance assessment for mycelium composite applications. *Advanced Materials Letters* Volumen 9(1), 71-80. doi: <http://dx.doi.org/10.5185/amlett.2018.1977>
- [43] F. APPELS, J. DIJKSTERHUIS, K. JANSEN, P. KRIJGSHELD. 2018. Hydrophobin gene deletion and enviromental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of thhe material. *Scientific Reports* Volumen 8. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23171-2>
- [44] R. LIU et al. 2019. Industrial crops & products preparation of a kind of novel sustainable micelium / cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties. *Industrial Crop Production* Volumen 141, 111732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111732>
- [45] D. GRIMM, H. WÖSTEN. 2017. Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology* volumen 102, 7795-7803. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>
- [46] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2021. Informe consolidado de emisiones y transferencia de contaminantes 2005-2019. Departamento de Información Ambiental. Santiago, Chile.
- [47] N. ATTIAS, et al. 2020. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and eperimental analysis. *Journal of Cleaner Production* Volumen 246, 119037. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>
- [48] G. WIMMERS, J. KLICK, L. TACKABERRY, C. ZWIESIGK, K. EGGER. 2019. Fundamental studies for designing insulation panels from wood shavings and filamentous fungi. *BioResources* Volumen 14(3), 5506-5520. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.5506-5520>
- [49] E. GOMES, R. DA SILVA, J. DE CASSIA, G. LADINO. 2018. Fugal growth on solid substrares: A physiological overview. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63990-5.00003-7>
- [50] F. ZADRAZIL. 1975. Influence of CO₂ concentration on the mycelium growth of three *Pleurotus* species. *European journal of applied microbiology and biotechnology*. Volumen 1,

327 - 335. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01382692>

- [51] L. HEATON, E. LOPEZ, P. MAINI, M. FRICKER, N. JONES. 2010. Growth-induced mass flows in fungal networks. *Proceedings of the Royal Society* Volumen Junio, 3265-3274. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0735>
- [52] J. CAMPOS. 2015. Normativa chilena: instrumentos, actores, hitos y desafíos. *Revista de Ingeniería* Volumen 41, 78-84. doi: <http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i41.777>
- [53] M. JONES, T. BHAT, C. WANG, K. MOINUDDIN, S. JOHN. 2017. Thermal degradation and fire reaction properties of mycelium composites. *Scientific Reports* Volumen 8, 17583. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36032-9>
- [54] ARQUITECTURA Y ENERGÍA, PORTAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD EN ARQUITECTURA Y EDIFICACIÓN. 2015. NCh853. [En línea] <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/nch-853/> [consulta: 18 de octubre, 2022]
- [55] MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. (2009). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, OGUC, Título 4: De la Arquitectura. Capítulo 1: De las Condiciones de Habitabilidad. Santiago de Chile: MINVU.
- [56] Ley 21455 del 2022. Marco de Cambio Climático. 30 de mayo 2022. D.O No. 13191-12
- [57] K. MARTÍNEZ, G. PRUDENCIO, M. CORDARO, P. MOLINA, et al. 2021. Nuevos enfoques de sustentabilidad en construcción en el contexto internacional. [Webinar] Certificación Edificio Sustentable https://youtu.be/y_uJZghejHI
- [58] I. GÓMEZ, M. ODRÍAZOLA, K. MARTÍN, E. PÉREZ, I. GONZÁLEZ, N. ROMERO. Física de edificios: Transmisión de calor y masa en cerramientos. Universidad del País Vasco. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. España.
- [59] C. RODE, R. PEUHKURI, B. TIME, K. SVENNBORG, T. OJANEN. 2007. Moisture buffer value of building materials. *Journal of ASTM International* Volumen 4 (5), 100369. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/JAI100369>
- [60] B. KREIGER, W. SRUBAR. Moisture buffering in buildings: A review of experimental and numerical methods. *Energy and Buildings* Volumen 202, 109394. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109394>
- [61] S. MARCEAU, G. DELANNOY. 2017. Durability of bio-based concrete. *Bio-aggregates Based Building Materials*, 167 - 185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121800>
- [62] E. ELSACKER, K. PETERS, W. PONCELET. 2018. Growing materials at home: Hard Mycelium Materials Manual. [En línea] <https://biofabforum.org/t/growing-materials-at-home-hard-mycelium-materials-manual/201> [consulta: 2/05/2022]
- [63] A. CANTERA, E. GENTILE. 2020. Protocolo de Biofabricación con Micelio. [En línea] https://www.academia.edu/42981429/Protocolo_de_Biofabricaci%C3%B3n_con_micelio [consulta: 2/05/2022]
- [64] CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA, COMUNIDAD DE MADRID. Guía sobre Materiales Aislantes y Eficiencia Energética. Madrid. *Gráficas Arias Montano, S.A.* 2012.
- [65] CChC .2020. La reglamentación térmica y los desafíos de la eficiencia energética En

- la vivienda. <https://cchc.cl/comunicaciones/opiniones/la-reglamentacion-termica-y-los-desafios-de-la-eficiencia-energetica-en-las-viviendas>
- [66] A. STOJANOVIC, M. KOEBEL, J. SCARTEZZINI. 2015. Low cost silica aerogel production.
- [67] FUNGITURISMO. 2017. ¿Qué diferencia hay entre un hongo y una seta. [En línea] <http://www.fungiturismo.com/que-diferencia-hay-entre-hongo-seta> [consulta: 10 de diciembre 2021]
- [68] ANAPE. 2022. Propiedades del EPS. [En línea] <http://www.anape.es/pdf/ficha73.pdf> [consulta: 1 de diciembre 2022]
- [69] ESTISOLCONSTRUCCIÓN. 2022. Placa aislante térmico isoplancha EPS . [En línea] <https://construccion.grupoestisol.com/productos/aislacion-termica-y-acustica/isoplancha/placa-aislante-termico-isoplancha-eps-densidad-25kg-m-25mm-x-1000mm-x-1000mm.html> [consulta: 1 de diciembre 2022]
- [70] ONDAC. 2022. Manual de precios. [En línea] <https://manual.ondac.com/cl/> [consulta: 1 de diciembre 2022]
- [71] MARKETS AND MARKETS. 2018. EPS industry by product type, end-use industry and region. Global forecast to 2023. [En línea]. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/expanded-polystyrene-market-1138.html> [consulta: 1 de diciembre 2022]
- [72] BANCO MUNDIAL. 2022. PIB per cápita - Latin America and the Caribbean. [En línea] <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=ZJ> [consulta: 1 de diciembre, 2022]
- [73] A. GANDIA, J. VAN DEN BRANDHOF, F. APPELS, M. JONES. 2021. Flexible fungal materials: shaping the future. *Trends in Biotechnology* Volumen 39, Nro. 12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.03.002>
- [74] Y. XING, M. BREWER, H. EL-GHARABAWY, G. GRIFFITH, P. JONES. 2018. Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Volumen 121, 022032. doi: [10.1088/1755-1315/121/2/022032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032)
- [75] Z. YANG, F. ZHANG, B. STILL, M. WHITE, P. AMSTISLAVSKI. 2017 Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volumen 29, 04017030. doi: <https://doi.org/10/gc4kq9>
- [76] T. BHAT, M. JONES, E. KANDARE, R YUENG, C.H. WANG, S. JOHN. 2018. Biomass and Waste-derived Sustainable Mycelium Composite Construction Materials with Enhanced Fire Safety. Publicación de conferencia. *18th European Conference on Composite Materials* Atenas, Grecia. Del 24 al 28 de Junio, 2018.
- [77] L. JIANG, D. WALCZYK, G. MCINTYRE, R. BUCINELL, G. TUDRYN. 2017. Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium bound cores and preforms. *Journal of Manufacturing Systems*. Volumen 28, 50-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmpro.2017.04.029>
- [78] Radier de hormigón para piso industrial. 2023. Generador de precios Chile. [en línea] http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=10|0_0|RSI001|rsi_001:_0_10_2c6_0_1c3_0_1_0_1_0_1_1c9_0_1_0_1c3_0

- [79] M. Peters, K. Timmerhaus, R. West. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. *McGraw-Hil*, 2002.
- [80] E. RIES. 2011. The Lean Startup How Today Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses. Nueva York, EEUU: *Crown Publishing Group*.
- [81] E. ORTEGÓN, J. PACHECO, A. PRIETO. 2005. Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Santiago, Chile: *Naciones Unidas*
- [82] MICOSECHA. 2021. Micelio en grano de Hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*) - 2 Kilos. [En línea] <https://www.micosecha.cl/product-page/micelio-en-grano-de-hongo-ostra-pleurotus-ostreatus-2-kilos> [consulta: 2 de diciembre, 2022]
- [83] D. SHEN, H. SHEN, Q. YANG, S. CHEN, Y. DUN, Y. LIANG, et al. 2021. Deciphering succession and assembly patterns of microbial communities in a two-stage solid-state fermentation system. *Applied and Industrial Microbiology*, Volumen 9, 2. doi: <https://doi.org/10.1128/Spectrum.00718-21>
- [84] S. KLAMT, R. MAHADEVAN, O. HÄDICKE. 2017. When do two-stage processes outperform one-stage processes? *Biotechnology Journal*, Volumen 13, 2, 1700539. doi: <https://doi.org/10.1002/biot.201700539>
- [85] Q. FANG, J. ZHONG. 2008. Two-stage culture process for improved production of ganoderic acid by liquid fermentation o higher fungus *Ganoderma lucidum*. *Biotechnology Progress* Volumen 8, 1, p. 51-54. doi: <https://doi.org/10.1021/bp010136g>
- [86] D. MEIGS. 2022. Six steps to mushroom farming. [En línea] <https://extension.psu.edu/six-steps-to-mushroom-farming> [consulta: 7/11/2022]
- [87] P. JOÁŠ. 2009. Modelling and control of tunnel pasteurizers. Diploma Thesis. Praga. Chzec Technical University in Prague. Faculty of Electrical Engineering.
- [88] M. FRIEL, A. MCLOUGHLIN. 2000. Production of a liquid inoculum/spawn of *Agaricus bisporus*. *Biotechnology Letters*. Volumen 22, 351-354. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1005616516646>
- [89] PIPEDRIVE. 2022. Método SPIN: Guía y Resumen para Gerentes de Ventas. [En línea] <https://www.pipedrive.com/es/blog/metodo-spin> [consulta: 12 de diciembre, 2022]