



**Universidad de Concepción**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Ingeniería Civil**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE PINCHIPS DE EUCALIPTO Y/O  
RESIDUO DE CÁÑAMO COMO REEMPLAZO DEL CÁÑAMO VIRGEN EN EL HEMPCRETE**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil

Por: Nicole Ávila Vidal  
Profesor Guía: Dr. Alex Schwarz

MAYO 2024  
Concepción, Chile

© 2024 Nicole Ávila Vidal

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## RESUMEN

Los aislantes térmicos tradicionales poseen una carga ambiental importante, ya que son productos que en su composición son derivados del petróleo y del plástico en su composición. En respuesta a esta problemática, surgen opciones más sustentables. Dentro de las alternativas a materiales aislantes térmicos de viviendas se encuentran el uso de materiales de origen vegetal, como lo es el Hempcrete, compuesto de cáñamo, cal y agua, que desarrolla baja resistencias mecánicas pero que compensa con propiedades térmicas que permiten clasificarlo como aislante térmico. Este tipo de material posee una variabilidad de comportamiento una vez finalizado, producto de procesos no estandarizados en su confección, como lo es la compactación y la trabajabilidad lo que representa un desafío para el diseño de mezclas. Por otra parte, al ser una alternativa sustentable, el hempcrete utiliza cáñamo en estado virgen, por lo que resulta interesante analizar residuos como reemplazo de este. En Chile, las industrias forestal y agrícola se posicionan como una de las principales actividades económicas y el reciclaje de sus subproductos y residuos posee un gran potencial técnico y ambiental.

El objetivo de esta investigación fue analizar mezclas basadas en cal pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo con el fin de evaluar su factibilidad como reemplazo de hempcrete para su uso práctico como aislante térmico de muros. Para ello, se realizó una revisión del estado del arte que permitiera determinar las dosificaciones, métodos de mezclas, propiedades mecánicas, trabajabilidad, compactación y secado. Finalmente, se realizó el análisis de ciclo de vida para comprender de manera integral cómo estas mezclas afectan el medio ambiente, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en la elección de materiales de construcción.

Los resultados muestran que los residuos estudiados presentan evidentes similitudes en cuanto a propiedades físicas, químicas, distribución granulométrica, así como en su comportamiento mecánico. Con respecto a las mezclas, se obtienen densidades que pueden asociarse a conductividades térmicas propias de hempcrete y resistencias a la compresión suficientes para uso práctico en la aislación de muros. Las mezclas con mejor desempeño técnico y ambiental fueron las que estaban compuestas 100% por residuo de cáñamo, 50% de pinchips de eucalipto y 50% residuo de cáñamo, 60% de pinchips de eucalipto y 40% de residuo de cáñamo.

## **ABSTRACT**

Traditional thermal insulators carry a significant environmental burden as they are products derived from petroleum and plastic. In response to this issue, more sustainable alternatives have emerged. Among the alternatives for home thermal insulation materials, the use of plant-based materials such as Hempcrete is notable. Hempcrete, composed of hemp, lime, and water, exhibits low mechanical resistance but compensates with thermal properties that classify it as a thermal insulating material. This type of material shows variability in behavior once completed due to non-standardized processes in its fabrication, such as compaction and workability, posing a challenge for mix design. Furthermore, being a sustainable alternative, Hempcrete uses virgin hemp, making it interesting to analyze waste as a replacement for it in efforts to increase the use of residues. In Chile, the forestry and agricultural industries stand as one of the main economic activities, and the recycling of their by-products and residues holds great technical and environmental potential.

The objective of this research was to analyze mixtures based on lime, eucalyptus pinchips, and/or hemp residue to assess their feasibility as a replacement for hempcrete for practical use as thermal insulation for walls. To achieve this, a state of the art review was conducted to determine the dosages, mixing methods, mechanical properties, workability, compaction, and drying processes of these mixtures. Finally, a Life Cycle Assessment was performed to comprehensively understand how these mixtures impact the environment, providing valuable information for decision making in the selection of construction materials.

The results show that the studied residues exhibit clear similarities in terms of physical, chemical properties, granulometric distribution, as well as in their mechanical behavior. Regarding the mixtures, densities are obtained that can be associated with thermal conductivities typical of hempcrete, and compressive strengths are sufficient for practical use in wall insulation. The mixtures with the best technical and environmental performance were those composed of 100% waste hemp, 50% eucalyptus pinchips, and 50% waste hemp, as well as 60% eucalyptus pinchips and 40% waste hemp.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Laboratorio de Hormigones y Mecánica de Suelos del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por permitir el uso de sus instalaciones y a su personal, Don Carlos Bustos, Alex Muñoz, Alex González, Leslie Baeza, por su constante apoyo y asistencia durante la etapa de investigación.

Agradecimientos al fondo ANID BASAL FB210015 CENAMAD

Agradezco de forma especial a la Unidad de Desarrollo Técnico de la Universidad de Concepción, en especial a la investigadora Cecilia Fuentealba, por proporcionar los residuos para el desarrollo de esta investigación además del apoyo constante a lo largo de este tiempo.

Agradezco al profesor, Mauricio Pradena, por su interés, disposición y apoyo a lo largo de este tiempo, y a mi comisión, profesores Alex Schwartz, Daniella Escribano, por su disposición y recomendaciones para el correcto desarrollo y término de la investigación.

Finalmente, a mi Familia en especial Mamá, Constanza, Diego, Patricio. A mi amiga Javiera Villar, por acompañarme en los momentos buenos y malos. Y a todos aquellos que no han sido mencionados pero que estuvieron siempre conmigo, confiando en que lograría superar este desafío tan importante ,y que me ayudaron a crecer como persona y profesionalmente.

**Índice de Contenidos**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Metodología de trabajo.....	4
1.5 Principales resultados y conclusiones.....	4
1.6 Organización de la Tesis.....	5
CAPÍTULO 2 HEMPCRETE Y MEZCLAS BASADAS EN CAL DE PINCHIPS DE EUCALIPTO Y/O RESIDUO DE CÁÑAMO COMO ALTERNATIVA A LOS AISLANTES TRADICIONALES.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Hempcrete, características relevantes y principales usos.....	7
2.3 Uso de subproductos forestal y residuos agrícolas como potenciales aislantes térmicos.....	17
2.4 Conclusión.....	18
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	20
3.1 Introducción.....	20
3.2 Materiales.....	20
3.3 Experimentación.....	23
3.4 Evaluación de resistencia a la compresión.....	32
3.5 Cuantificación de impacto ambiental de las mezclas desarrolladas.....	33
3.6 Conclusión.....	39
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....	40
4.1 Introducción.....	40
4.2 Caracterización de residuos.....	40
4.3 Resultados de trabajabilidad.....	43
4.4 Resultados de compactación.....	45

---

4.5	Resultados de propiedades mecánicas .....	49
4.6	Análisis de Ciclo de Vida .....	58
4.7	Conclusión .....	60
	CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....	62
	REFERENCIAS .....	66
	ANEXO 4.1: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS .....	72
	ANEXO 4.1.1: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	72
	ANEXO 4.1.2: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	73
	ANEXO 4.1.3: RESULTADOS DE REGISTRO FOTOGRAFICO MICROSCOPICO SEM .....	74
	ANEXO 4.2: REGISTRO FOTOGRAFICO TRABAJABILIDAD .....	75
	ANEXO 4.3: REGISTRO FOTOGRAFICO DE LAS PROBETAS .....	76
	ANEXO 4.4: RESULTADOS OPEN LCA .....	77

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Conductividad térmica de materiales tradicionales, hempcrete y materiales en base a residuos agrícolas (fuente: adaptado Kumar et al., 2020b)	9
Tabla 2.2: proporciones de mezcla para aislamiento con hempcrete. (fuente: adaptado Magwood, 2016)	11
Tabla 2.3: Características de cales naturales. (Fuente: Adaptado Stanwix & Sparrow, 2014)	13
Tabla 3.1: Caracterización cal hidráulica para morteros Soprocal® (Fuente: Soprocal®)	23
Tabla 3.2: dosificación de las mezclas	25
Tabla 3.3: dosificación de la proporción 1:1.5:1.5	26
Tabla 3.4: dosificación de la proporción 1:2:2	27
Tabla 3.5: Categorías de impacto	37
Tabla 4.1: Propiedades físicas de la madera de cáñamo y el pinchips de eucalipto	41
Tabla 4.2: Composición química de la madera de cáñamo y el pinchips de eucalipto	42
Tabla 4.3: Resultados prueba de trabajabilidad proporción1:1.5:1.5	44
Tabla 4.4: Resultados prueba de trabajabilidad proporción1:2:2	45

## Índice de figuras

Figura 2.1: Dependencia de conductividad térmica del hempcrete de la densidad y del tamaño del chip de cáñamo (fuente: Balčiūnas et al., 2016).....	8
Figura 2.2: Comparación entre 1 m <sup>2</sup> de muro con aislante tradicional, muro de hempcrete y muro de bloques de hempcrete (Fuente: adaptado (Di Capua et al., 2021) .....	10
Figura 2.3: Ciclo de la cal (fuente: adaptado Hempel & Läderach, 2021) .....	12
Figura 2.4: Prueba de mezcla, (a) apretar un poco de hempcrete, hasta formar una pelota, (b) presionar con un dedo la pelota, (c) si se parte de forma limpia, la mezcla es óptima. (Fuente: Stanwix & Sparrow, 2014). .....	15
Figura 2.5: Esfera de hempcrete para mezclas de densidad baja a media. (fuente: Magwood, 2016).....	15
Figura 2.6: Método de compactación del hempcrete en terreno (Fuente: Building Green, 2010).....	16
Figura 3.1: Pinchips de eucalipto.....	21
Figura 3.2: Madera de cáñamo.....	21
Figura 3.3: Madera de cáñamo virgen .....	22
Figura 3.4: Programa experimental con 3 etapas consecutivas. ....	23
Figura 3.5: Esquema etapa 1 .....	24
Figura 3.6: Esquema etapa 2.....	26
Figura 3.7: (a) Equipo de trabajabilidad; (b) altura de descenso; (c) profundidad de descenso.....	29
Figura 3.8: (a) equipo compactador; (b) compactación de probeta.....	31
Figura 3.9: Incubadora BIOBASE con condiciones controlada de humedad y temperatura.....	32
Figura 3.10: Probeta ensayada a resistencia a la compresión .....	33
Figura 3.11: Streamlined Análisis Ciclo de Vida del producto. ....	34

Figura 4.1: imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM); (a) residuo de cáñamo; (b) pinchips de eucalipto.	41
Figura 4.2: Comparación de curvas granulométrías entre la madera de cáñamo y los residuos.....	43
Figura 4.3: comparación de curvas granulométrica cáñamo virgen versus curvas de literatura .....	45
Figura 4.4: Propiedades mecánicas (a) resistencia a la compresión mezcla 1:1,5:1,5, (b) resistencia a la compresión mezcla 1:2:2. ....	46
Figura 4.5: (a) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (b) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5; (c) densidad a los 14 días mezcla 1:2:2; (d) densidad a los 28 días mezcla 1:2:2.....	48
Figura 4.6: (a) densidad de confección 700 kg/m <sup>3</sup> ; (b) densidad de confección 500 kg/m <sup>3</sup> . ....	49
Figura 4.7: (a) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (b) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5; (c) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (d) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5.....	51
Figura 4.8: (a) densidad de confección 700 kg/m <sup>3</sup> ; (b) densidad de confección 500 kg/m <sup>3</sup> . ....	52
Figura 4.9: Propiedades mecánicas para la mezcla 1:1.5:1.5 (a) resistencia a la compresión a los 14 días (b) resistencia a la compresión a los 28 días. ....	54
Figura 4.10: determinación densidad para la mezcla 1:1.5:1.5 (a) densidad de las mezclas a los 14 días (b) densidad de las mezclas a los 28 días.....	55
Figura 4.11: Propiedades mecánicas para la mezcla 1:2:2 (a) resistencia a la compresión a los 14 días (b) resistencia a la compresión a los 28 días. ....	56
Figura 4.12: determinación densidad para la mezcla 1:2:2 (a) densidad de las mezclas a los 14 días (b) densidad de las mezclas a los 28 días.....	57
Figura 4.13: Resultados del impacto ambiental para la proporción 1:1,5:1,5 ...	58
Figura 4.14: Resultados del impacto ambiental para la proporción 1:2:2 .....	59

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Motivación**

Los aislantes térmicos tradicionales, tienen como punto de interés la carga ambiental incorporada durante su producción, consumiendo cantidades importantes de energía (Güereca et al., 2019; Zabalza Bribián et al., 2011), junto con la liberación de agentes contaminantes o compuestos volátiles al ambiente (en el caso de lanas) y la explotación de recursos no renovables (en el caso de plásticos). Además, son materiales que prácticamente no tienen procesos de reutilización o reciclaje, generando desechos una vez terminada su vida útil (Liu et al., 2017; Schiavoni et al., 2016), lo que genera un mayor impacto ambiental.

Actualmente, los principales materiales utilizados para aislación térmica de las viviendas son, lana de vidrio, lana de roca, poliestireno expandido, poliestireno extruido y poliuretano. La figura 1.1 muestra la cantidad de carbono que emiten los aislantes tradicionales durante su proceso de fabricación. Sin embargo, en la misma figura se presentan materiales de origen natural cuyas emisiones de CO<sub>2</sub> durante su fabricación son considerablemente menores a los aislantes tradicionales.

Una alternativa de reemplazo a los aislantes tradicionales, son los de origen natural. Existen materiales que utilizan chip natural, como lo es Hempcrete, el cual es un material fabricado a partir de cáñamo, cal y agua. Por su composición, busca utilizar mínimas cantidades de energía durante su proceso de fabricación. Este material ha sido investigado ya que el cáñamo es un material virgen, que durante su proceso de crecimiento secuestra CO<sub>2</sub>.

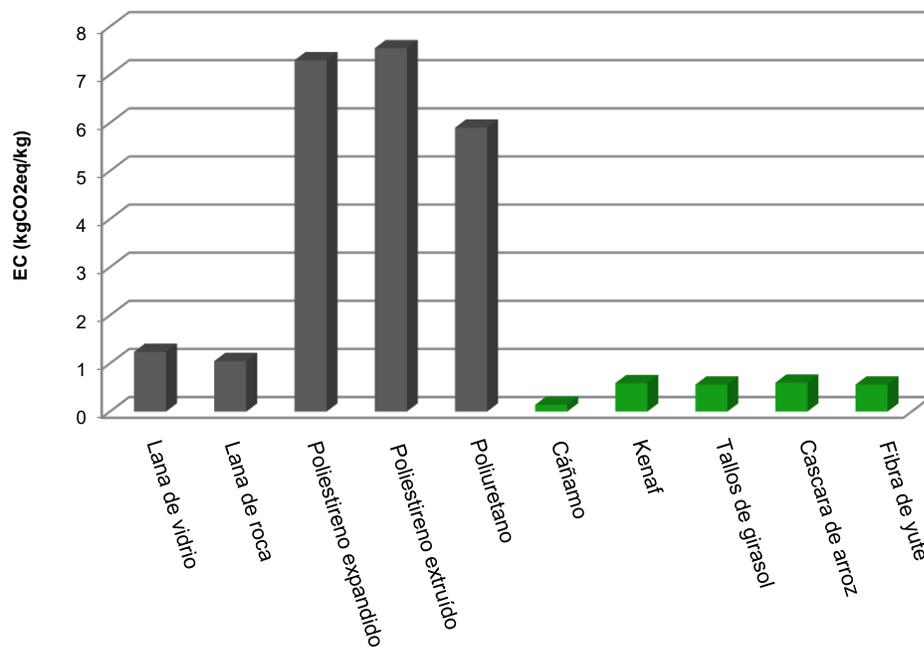


Figura 1.1: Carbono incorporado en fase de producci3n de materiales aislantes.

Fuente: Modificado de (Kumar et al., 2020a).

Por otra parte, existen residuos de industrias como la de celulosa y madera que tambi3n secuestran CO<sub>2</sub>. Cuando estos residuos son incinerados, ese CO<sub>2</sub> secuestrado retorna a la atmosfera. Sin embargo, si esos residuos se utilizan como parte de un material de construcci3n, el CO<sub>2</sub> sigue estando secuestrado. Por esta raz3n, resulta muy atractivo analizar la posibilidad de utilizar un residuo de este tipo como reemplazo del material cafamo virgen en hempcrete.

En particular, en la regi3n del Biob3o, zona forestal genera productos (madera y pulpa) y subproductos o residuos como lo es el pinchips de eucalipto. Por otra parte, en la Regi3n del Maule, se produce cafamo industrial, del cual extraen, semillas, aceite y fibra, generando residuo de cafamo, de los cuales resulta importante hacernos cargo.

Resulta necesario, por lo tanto, analizar la utilización de pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo como reemplazo del cáñamo virgen en la producción de hempcrete. Particularmente las características de las nuevas mezclas, trabajabilidad, su comportamiento mecánico, densidades y capacidad aislante, además de cuantificar los beneficios ambientales asociados.

## **1.2 Hipótesis**

Mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo permite obtener iguales o mejores resultados técnicos y ambientales que el hempcrete.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar el desempeño técnico y ambiental de mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo como reemplazo del cáñamo virgen en el hempcrete.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar físicamente pinchips de eucalipto y/o cáñamo para uso en mezclas basadas en cal.
- b) Evaluar trabajabilidad de mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o cáñamo.
- c) Evaluar resistencia a la compresión y densidad de mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o cáñamo
- d) Cuantificar el impacto ambiental de mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo.

## **1.4 Metodología de trabajo**

Como primera etapa en el desarrollo de esta tesis, se revisó el estado del arte del hempcrete, diseño de mezclas, propiedades físicas y mecánicas, además de Análisis de Ciclos de Vida, recopilando de esta manera información que permitió analizar y determinar el nicho de estudio que presenta en la actualidad el hempcrete.

Continuamos con el trabajo experimental, que comenzó con la caracterización del pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo. Luego, se definieron las proporciones de mezclas a realizar para confeccionar las probetas.

Se realizaron ensayos de laboratorio correspondientes a trabajabilidad, resistencia a la compresión y se determinó la densidad de cada probeta.

Finalmente, se realizó una cuantificación ambiental para las mezclas basadas en cal de pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo para recomendar aquellas con mejor desempeño técnicos y ambientales.

## **1.5 Principales resultados y conclusiones**

Los resultados demuestran tanto las mezclas con pinchips como con residuo de cáñamo.

Sin embargo, las mezclas con residuo de cáñamo desarrollan mejores resultados para las proporciones 1:1,5:1,5 y 1:2:2, con resistencia a la compresión de 0,08 y 0,1 MPa, respectivamente y con respecto a la evaluación ambiental son las que presentan menor impacto.

Esta investigación tiene como objetivo conocer la evaluación ambiental del Hempcrete en Chile. Además de las propiedades físicas y mecánicas a los 14 y 28 días de las mezclas para comprobar la información existente en literatura

## **1.6 Organización de la Tesis**

La presente investigación contiene 5 capítulos. El capítulo 2, se aborda el estado del arte y los antecedentes más relevantes de las variables que condicionan el comportamiento del Hempcrete, comenzando con una descripción en el diseño de mezclas, trabajabilidad, compactación, secado de probetas y el análisis de ciclo de vida.

En el capítulo 3 describe la metodología de los ensayos para caracterizar los materiales utilizados en la confección de las mezclas, dentro de los cuales destacan caracterización básica de los subproductos de la industria forestal y residuos agrícolas, la determinación de trabajabilidad, el método de compactación y los ensayos para determinar las propiedades mecánicas.

Cabe destacar que se presenta método de trabajabilidad y compactación, desarrollados con el propósito de estandarizar estos procedimientos. Finalmente, en este capítulo se describen los softwares utilizados, la base de datos y la evaluación de impacto para llevar a cabo de manera más efectiva los análisis de ciclo de vida del producto en desarrollo.

En el capítulo 4 se resumen los resultados de todos los ensayos descritos en el capítulo 3 y llevados a cabo en los subproductos y residuos utilizados. Se exponen comentarios de los resultados y se plantean algunas conclusiones iniciales de la investigación, las cuales se centran en el motivo de la pérdida de resistencia mecánica frente a las diferentes densidades obtenidas.

En el capítulo 5 expone las principales conclusiones de esta investigación y algunas recomendaciones a tener en cuenta en futuras investigaciones, que permitan analizar la incidencia posible de otras variables en la resistencia y densidad.

## **CAPÍTULO 2 HEMPCRETE Y MEZCLAS BASADAS EN CAL CON RESIDUOS INDUSTRIALES COMO ALTERNATIVA A LOS AISLANTES TRADICIONALES**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo, se describe el hempcrete como material alternativo para uso de aislación térmica en las viviendas, destacando sus ventajas en comparación con otros materiales más comunes. Se detallan los métodos más utilizados para las preparaciones de mezclas y se analizan los tipos de compactación y trabajabilidad que se emplean actualmente. Lo que se expone en este capítulo sirve para contextualizar y comprender lo que actualmente se ha investigado en hempcrete, particularmente en el ámbito de mezclas, propiedades físicas, trabajabilidad, compactación y análisis de ciclo de vida.

### **2.2 Hempcrete, características relevantes y principales usos**

El hempcrete, es un material compuesto por cáñamo, cal y agua, se destaca como una alternativa prometedora en la industria de la construcción, especialmente como aislante térmico en viviendas. Aunque no posee propiedades estructurales significativas, su baja resistencia a la compresión, se compensa con su buena conductividad térmica. La resistencia a la compresión de las mezclas 2:1 (aglutinante: cáñamo) oscila entre 0,2 y 0,12 MPa (Arnaud & Gourlay, 2012; Cerezo, 2005; De Bruijn P, 2008; Hirst et al., 2012). En cambio, para mezclas 1,5:1 (aglutinante: cáñamo) es de 0,11 MPa (Cerezo, 2005).

Respecto a las conductividades térmicas de las mezclas mencionadas, estas varían entre de 0,06 a 0,115 W/m. K (Cerezo, 2005; Stanwix & Sparrow, 2014). Esta última se encuentra dentro de los rangos que tienen los aislantes

tradicionales (Jere, 2018). La porosidad del hempcrete es beneficiosa para su desempeño acústico y permeabilidad al vapor, que lo hace mejor frente a otros materiales convencionales. La porosidad está influenciada en gran medida por el uso de pequeños chips de cáñamo, ya a que, a menor tamaño, menor espacio entre estos, por lo tanto, menor flujo de aire (Stanwix & Sparrow, 2014). Los factores que afectan la conductividad térmica de este tipo de material son tamaño del chip de cáñamo, densidad (Balčiūnas et al., 2016), tal como se observa la figura 2.1. Por otra parte, un exceso de compactación de las mezclas aumenta la densidad y disminuye su conductividad térmica (Magwood, 2016; Stanwix & Sparrow, 2014).

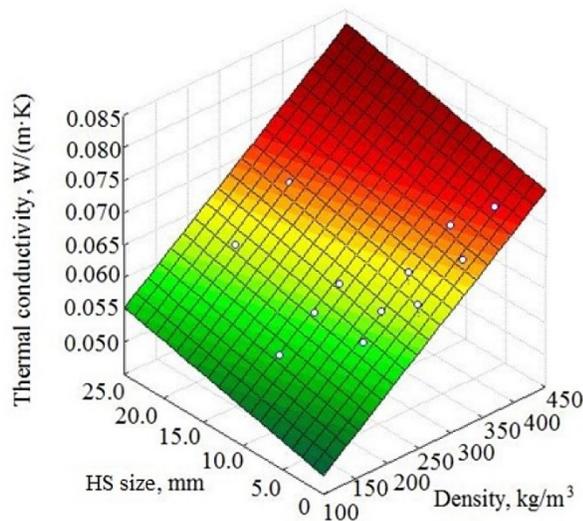


Figura 2.1: Dependencia de conductividad térmica del hempcrete de la densidad y del tamaño del chip de cáñamo (fuente: Balčiūnas et al., 2016)

Es importante señalar que este tipo de aislantes térmicos tienen el menor impacto ambiental durante su producción, en referencia al uso de energía y emisión de gases contaminantes. La tabla 2.1 presenta una comparación entre conductividad térmica de materiales convencionales de origen inorgánico e

orgánico, donde los inorgánicos muestran conductividades térmicas superiores a las de los aislantes tradicionales.

Tabla 2.1: Conductividad térmica de materiales tradicionales, hempcrete y materiales en base a residuos agrícolas (fuente: adaptado Kumar et al., 2020b)

<b>Material</b>	<b>Conductividad térmica (mW/m<sup>2</sup>K)</b>
Poliestireno expandido	36
Poliestireno extruido	35
Poliuretano	28
Lana de Roca	36
Hempcrete	81
lino	33-90
Cáscara de arroz	48-80
kenaf	26-44

A pesar de que el hempcrete presenta una conductividad térmica relativamente alta en comparación con materiales como el poliestireno expandido y otros, su principal ventaja radica en sus bajas emisiones durante su fabricación. Esta característica, junto con su buen desempeño térmico, lo convierte en una opción atractiva para una construcción sostenible. Además, al realizar un Análisis de Ciclo de Vida del hempcrete, se revela una ventaja adicional, su menor impacto ambiental a lo largo de todas las etapas de producción, uso y eventual disposición final.

La figura 2.2, muestra los resultados en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, demostrando cómo el muro de hempcrete produce una cantidad menor de CO<sub>2</sub> que las otras dos soluciones. Di Capua et al., (2021), señalan que durante la fase de cultivo del cáñamo tiene una alta absorción de CO<sub>2</sub>, además de la baja cantidad de procesos necesarios para llegar al producto final. Por otro lado, en la misma figura 2.2, las otras dos soluciones tienen valores más alto en emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo el muro tradicional (poliestireno), el que genera mayor emisión.

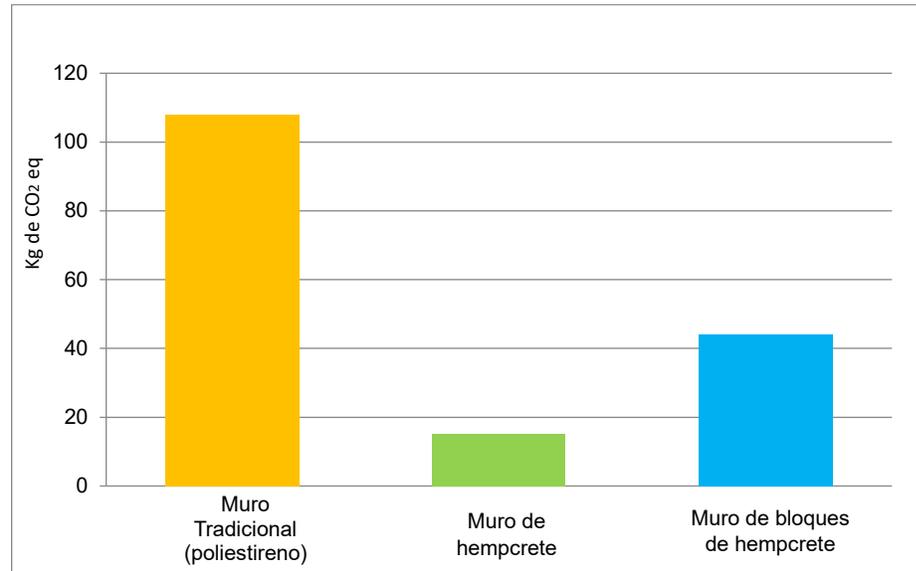


Figura 2.2: Comparación entre 1 m<sup>2</sup> de muro con aislante tradicional, muro de hempcrete y muro de bloques de hempcrete (Fuente: adaptado (Di Capua et al., 2021))

Por otra parte, Magwood (2016) propone diferentes densidades de utilización de hempcrete como reemplazo de los aislantes tradicionales. La tabla 2.2 muestra las proporciones de mezclas utilizadas para diferentes densidades y tipos de aislamiento térmico.

Tabla 2.2: proporciones de mezcla para aislamiento con hempcrete. (fuente: adaptado Magwood, 2016)

Tipo de mezcla	Tipo de aislamiento	Compactación requerida	Cáñamo (por masa)	Aglomerante (por masa)	Agua (por masa)
Densidad muy baja (150 a 200 kg/m <sup>3</sup> )	Rellenos sueltos, techos planos y cavidades de vigas de piso	ninguna	1	1	1,5
Densidad baja (200 a 250 kg/ m <sup>3</sup> )	Espacios de áticos inclinados con revestimientos estructurales	Suave, compactación mínima	1	1 a 1,5	1,5 a 2
Densidad media (250 a 350 kg/ m <sup>3</sup> )	Muros, con estado acabado de yeso o revestimiento no estructural	Compactación ligera	1	1,5 a 2	1,5 a 2
Densidad alta (350 a 500 kg/ m <sup>3</sup> )	Aislación bajo losas	Compactación firme	1	2 a 3	2 a 2,5

En cambio, Collet & Pretot (2014), señalan que la conductividad térmica del hempcrete depende tanto de la densidad como del contenido de agua. Por esta razón, medir la trabajabilidad en el hempcrete es un factor importante para verificar que no existan un exceso de agua en la mezcla.

La cantidad de agua que se incorpora en la mezcla está restringida, ya que el uso en grandes cantidades disminuye la resistencia a la compresión, la densidad y la conductividad térmica del material. (Collet & Pretot, 2014).

### 2.2.1 Tipos de cal utilizadas en el hempcrete

El principal aglomerante utilizado en el hempcrete es la cal, es un producto natural compuesto por carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ). Ha sido utilizado por el hombre como material de construcción desde tiempos antiguos, siendo el

principal material en la construcción de pirámides, mientras que los griegos la utilizaban para estatuas y decoraciones (Kemppainen, 2016). Los morteros fabricados a partir de cal son permeables al vapor, lo que ayuda al control de la humedad en la estructura y mantiene los materiales en buen estado. Por otra parte, tiene propiedades fungicidas, que hace que no permita la aparición de hongos, moho, bacterias y ácaros, algo muy importante en materiales orgánicos.

El carbonato de calcio se encuentra naturalmente en piedras calizas, coral y conchas. La figura 2.2 muestra el ciclo de la cal, una vez que el material se quema en horno, liberando el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), dejando óxido de calcio ( $CaO$ ), conocido como cal rápida o cal viva. Posteriormente, esta cal se hidrata en una reacción exotérmica, generando hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), que se conoce comúnmente como cal hidratada, la cual se usa con fines constructivos y su fijación es mediante carbonatación, recuperando el dióxido de carbono del ambiente.

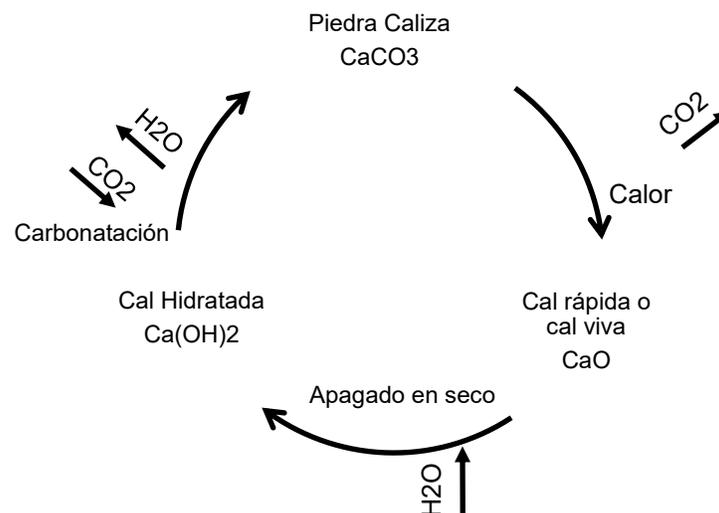


Figura 2.3: Ciclo de la cal (fuente: adaptado Hempel & Läderach, 2021)

Debido a que este proceso de carbonatación es muy lento (semanas, meses e incluso años en exposición al ambiente), se utiliza un tipo de cal proveniente de

piedras calizas específicas que son capaces de fraguar rápidamente al hidratarse, conocidas como cales hidráulicas. Este tipo cal tienen mejores resistencias, pero peores permeabilidades al agua y al vapor que cales tradicionales. Es por esto, se mezclan para obtener un equilibrio entre rapidez de fraguado, resistencia y permeabilidad. Es usual también utilizar algún material puzolánico, como cemento, para generar reacciones hidráulicas más rápidas que la cal hidráulica natural.

La elección del aglutinante también puede afectar a otras propiedades del material de construcción distintas de la sostenibilidad y la capacidad de carga. Algunos autores, por ejemplo, afirmaron que los hormigones de cáñamo fabricados con cemento tienen una conductividad térmica inferior (0,059 W/(m·K)) que los materiales equivalentes fabricados con cal (0,078 W/(m·K)) o cal hidráulica (0,076 W/(m·K)). (Arnaud & Gourlay, 2012).

La tabla 2.3 muestra los tipos de cales y sus respectivas características que existen en el mercado que es utilizado el hempcrete.

Tabla 2.3: Características de cales naturales. (Fuente: Adaptado Stanwix & Sparrow, 2014)

Tipo de cal	Ejemplo	Proceso de fijación	Velocidad de fijación	Permeabilidad al vapor	Resistencia
Cales de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	Cal hidratada		Lenta	Mayor	Baja
Cales hidráulicas	NHL 1-2	Mayormente carbonatación			
	NHL 2,5-3,5	Carbonatación e hidratación			
	NHL 5	Mayormente hidratación			
	Cementos	Hidratación			
			Rápida	Menor	Alta

La cal disponible en Chile no está destinada para la confección de productos como el hempcrete. En general, se utiliza para la confección de morteros y terminaciones. En Chile, solo hay unos pocos proveedores de cal, siendo los principales Sopocral y Química Universal.

Soprocral entre sus productos se encuentra la Cal Espuma, que corresponde a cal hidratada, destinada, según el fabricante, a la industria química, minera y fabricación de morteros para la construcción. Se comparó la ficha técnica del producto con normativas aplicables a hempcrete (EN459-1) existente en Europa, y la de origen chileno no cumple con los estándares utilizados para cales CL90 en relación con la cantidad de  $CaO + Mg$ . Respecto a la cal hidráulica proveída por Soprocral, no se presentan mayores diferencias, y según su naturaleza química, es posible clasificarla como una cal natural hidráulica 2 (NHL 2).

### **2.2.2 Trabajabilidad del hempcrete**

En la actualidad, no existe un método estandarizado para medir trabajabilidad en mezclas del hempcrete. En la figura 2.3, el operador toma una muestra y la moldea con sus manos para formar una esfera, a la que posteriormente se le aplica presión con los dedos para medir su estabilidad. Este proceso es inherente al usuario, lo que introduce un nivel de variabilidad. En el caso de hempcrete con densidad media, se espera que la esfera se forme de manera consistente y se sostenga desde la parte superior sin desmoronarse, sin embargo, al aplicar una presión con los dedos, debe romperse (Stanwix & Sparrow, 2014)



Figura 2.4: Prueba de mezcla, (a) apretar un poco de hempcrete, hasta formar una pelota, (b) presionar con un dedo la pelota, (c) si se parte de forma limpia, la mezcla es óptima. (Fuente: Stanwix & Sparrow, 2014).

En cambio, Magwood (2016), propone que al realizar una esfera (ver figura 2.4) se puede aplicar una fuerza moderada que mantenga su integridad, la proporción de agua es la adecuada. Además, estable los siguientes criterios:

- En mezclas para densidades muy bajas a bajas, la esfera presionada debe ser bastante frágil; se mantendrá su forma, pero si se agita o se presiona con fuerza.
- En mezclas para densidades media, la esfera debe mantener su integridad si se sujeta desde arriba y se agita ligeramente.
- En mezclas para densidades altas, la esfera presionada debe mantener su integridad incluso si se manipula bruscamente.



Figura 2.5: Esfera de hempcrete para mezclas de densidad baja a media. (fuente: Magwood, 2016)

Si la esfera gotea agua al comprimirse, significa que hay demasiada agua en la mezcla.

Al experimentar con la cantidad de agua, lo mejor es empezar con una mezcla demasiado seca e ir añadiendo agua poco a poco hasta conseguir la consistencia adecuada. Una vez que la mezcla esté demasiado húmeda, añadir más cáñamo y aglutinante no solucionará el problema, ya que el cáñamo de la mezcla húmeda absorberá rápidamente el exceso de agua y no estará disponible para los ingredientes secos añadidos.

### 2.2.3 Compactación del hempcrete

La compactación es un paso importante en la confección del hempcrete, ya que de esto depende la resistencia, densidad y aislamiento térmico del material. Dado que el hempcrete se utiliza como aislante térmico, no requiere un exceso de compactación ya que disminuye sus propiedades térmicas. Magwood (2016) y Stanwix & Sparrow (2014), mencionan la necesidad que el usuario este familiarizado con este proceso para conseguir la compactación óptima. (ver figura 2.5)



Figura 2.6: Método de compactación del hempcrete en terreno (Fuente: Building Green, 2010)

Finalmente, Stanwix & Sparrow (2014) señalan que la compactación del hempcrete no es una ciencia exacta debido a la naturaleza no estandarizada del método de aplicación. Aunque no es una tarea difícil, el éxito de la compactación depende en gran medida del nivel de experiencia de los que realizan este proceso. Un muro acabado con diferentes secciones de densidades no es tan estable como uno que posee una densidad constante. Es por esto, que Viel et al., (2020a), propone presiones de hasta 1 MPa durante la compactación.

## **2.3 Uso de subproductos forestal y residuos agrícolas como potenciales aislantes térmicos**

### **2.3.1 Pinchips de eucalipto**

En Chile, durante el 2022 se produjeron 4.389.760 de metros cúbicos de astillas. Las centrales de astillados concentran su actividad productiva en especies como *Eucalytus globulus* y *Eucalytus nitens* (Poblete Hernández et al., 2023).

En la región del Biobío, se concentra la mayor actividad astillera, la cual genera como subproducto el pinchips de eucalipto (Soto et al., 2021). Se entiende por pinchips a una partícula de madera de entre 3 y 9 mm de longitud, las cuales son desclasificadas por subdimensión en el proceso de astillado para el pulpaje, el cual no clasifica por normativa como astilla (Morales, 2006).

En particular, el pinchips de eucalipto presenta una forma similar a los chips de cáñamo utilizados en el hempcrete, siendo regulares con formas rectangulares, lo que permite garantizar una estabilidad en la mezcla. Por otra parte, el pinchips posee mayor densidad que el cáñamo debido a su naturaleza, el eucalipto durante su proceso de maduración alcanza entre 15 y 30 metros de altura, en

cambio, el cáñamo crece hasta 4 m. Esto último indica que el uso de pinchips de eucalipto con el mismo aglomerante de hempcrete entregaría densidades más altas y, por ende, mejores resistencias.

### **2.3.2 Cáñamo Industrial**

En la Región del Maule, Chile, se encuentra ubicada Diamond Hemp, una empresa dedicada a la producción de semillas, aceite y fibra a partir del cáñamo industrial. En el año 2021, la empresa cultivó 4 hectáreas, logrando una producción de aproximadamente 10 toneladas de cáñamo. (Amaro, 2021).

Es relevante destacar que este tipo de cáñamo comparte propiedades con el utilizado en la fabricación de hempcrete. Por lo tanto, resultaría interesante evaluar las mezclas basadas en cal como aislante térmico a partir de los residuos generados por la producción de Diamond Hemp.

## **2.4 Conclusión**

La dosificación de las mezclas del Hempcrete es compleja, ya que se debe lograr un equilibrio entre resistencia a la compresión, densidad y conductividad térmica. Por lo tanto, las proporciones de materiales deben ajustarse de la manera precisa y adaptarse a los materiales de cada zona. Además, el hempcrete presenta limitaciones de uso debido a su baja resistencia a la compresión, lo que supone un desafío lograr un incremento en esta propiedad, manteniendo su densidad y conductividad térmica dentro de los rangos aceptados de aislante térmico.

La cal desempeña un papel fundamental en estas mezclas. Sin embargo, se ha demostrado el impacto medioambiental que genera su producción de este

material debido a la gran cantidad de emisiones que produce y el alto consumo de energía, por lo que es una necesidad disminuir la cantidad de aglutinante que se utiliza en el hempcrete.

Por otra parte, se evidencia el incremento y un mal manejo de los residuos en Chile, destacando la baja tasa de valorización que existe actualmente, es por esto por lo que nace la necesidad de utilizar este tipo de subproducto.

Sin embargo, los estudios de carácter técnico no son suficientes y es necesario realizar análisis de sustentabilidad para determinar si existen beneficios ambientales con los materiales utilizados como reemplazo del hempcrete. Por último, el análisis de ciclo de vida permite conocer aspectos relevantes de un producto, sobre todo respecto a los recursos consumidos y emisiones generadas.

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se presenta la metodología de trabajo que sustenta esta investigación, la cual se estructura en tres etapas principales, cada una relacionada con los objetivos específicos planteados. Además, se detallan los materiales que fueron utilizados, los diseños de mezclas empleados, la confección de probetas, la metodología de trabajabilidad y compactación, el proceso de secado de probetas, las evaluaciones de propiedades mecánicas y, finalmente, la cuantificación del impacto ambiental del pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo, a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Cada caso de estudio explica detalladamente en este capítulo.

### **3.2 Materiales**

#### **3.2.1 Pinchips de eucalipto**

El pinchips de eucalipto que se utilizó proviene de residuos forestales, proporcionados por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción. Estos residuos se generan a partir del corte de astillas y no cumplen con la normativa para ser considerados como tales. Tienen forma rectangular con longitudes variables y se recibieron con contenido de humedad aproximadamente del 95%, como se observa en la figura 3.1.



Figura 3.1: Pinchips de eucalipto

### 3.2.2 Residuo de cáñamo

La madera de cáñamo utilizada proviene de residuos agrícolas la cual fue entregada por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción. Poseen forma irregular y fueron recibidas en estado seco, como se observa en la figura 3.2.



Figura 3.2: Madera de cáñamo

### 3.2.3 Cáñamo virgen

Para validar el método de compactación se utilizó madera de cáñamo virgen la que fue entregada por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción. La figura 3.3 representa la muestra a la cual se realizó la curva granulométrica según NCh 165 (2009), basada en ASTM C136.



Figura 3.3: Madera de cáñamo virgen

### 3.2.4 Cal hidráulica Soprocal

La cal hidráulica proviene de la piedra caliza o carbonato de calcio. Cumple con los requisitos exigidos por las normas NCh 1928 of.1986 y NCh 2256/1 of.2001. Se optó por este tipo de cal debido a su similitud con la cal hidráulica natural NHL2, que cumple con los requisitos de EN-459-1, según lo utilizado por Arnaud & Gourlay, 2012. Las propiedades de esta cal se detallan en la 3.1.

Tabla 3.1: Caracterización cal hidráulica para morteros Soprocal ® (Fuente: Soprocal ®)

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,65-0,75
Contenido de CaO total (%)	30-39
Contenido de SiO <sub>2</sub>	30-45
Contenido MgO (%)	0,4-1,4

### 3.2.5 Agua

El agua utilizada en las mezclas es la proveniente de la red pública proporcionada por la empresa Essbio, la cual cumple con la normativa NCh 1498 of.2012 sin contaminar antes de su uso.

### 3.3 Experimentación

Dada la cantidad de combinaciones de casos de esta investigación y con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible de obtener del comportamiento de las muestras, el programa experimental se dividió en tres etapas consecutivas, como se muestra en la figura 3.4.

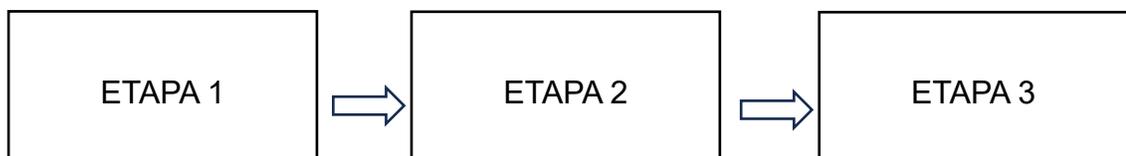


Figura 3.4: Programa experimental con 3 etapas consecutivas.

Se optó por esta estrategia para acotar el rango de estudio basándose a los resultados obtenidos en la fase anterior. De esta manera, para la primera etapa se definió el pinchips de eucalipto como material principal, las proporciones de

mezclas y las densidades húmedas según la revisión de la literatura, con el fin de determinar cuál dosis proporcionaba los mejores resultados. Dado que los resultados permitieron distinguir entre ambas dosis, en la siguiente etapa se trabajó con la incorporación de un nuevo residuo, con el objetivo de reducir la densidad final de las probetas, pero siempre manteniendo la resistencia a la compresión de las probetas.

### 3.3.1 Etapa 1

La etapa 1, se representa en la figura 3.5, y consta de dos tipos de dosificaciones diferentes y densidades de confección de  $500 \text{ kg/m}^3$  y  $700 \text{ kg/m}^3$ . Durante esta etapa se confeccionaron un total de 48 probetas.

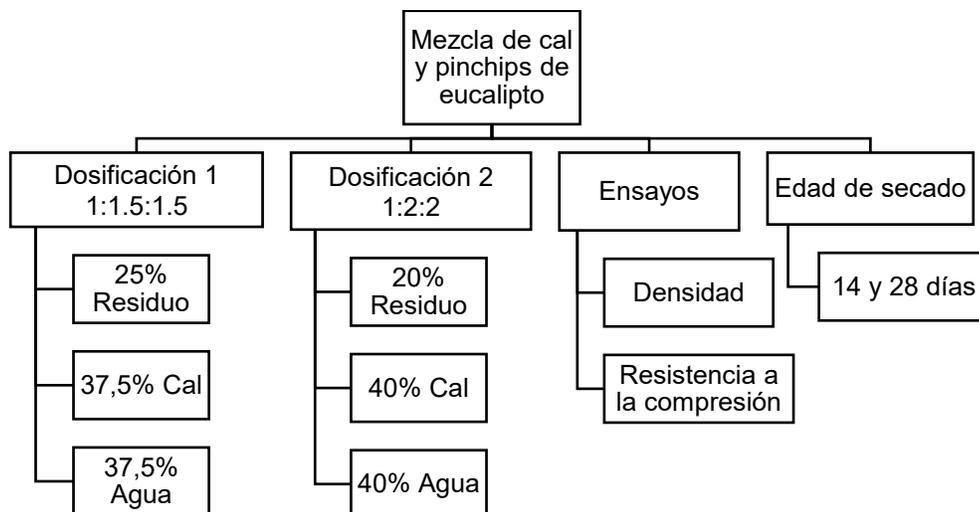


Figura 3.5: Esquema etapa 1

Las dosificaciones de las mezclas fueron obtenidas de la literatura para mezclas de hempcrete. Magwood, (2016), señala que, para mezclas con densidades medias, existen dos tipos de proporciones en peso de cáñamo, aglomerante y agua: 1:1.5:1.5 y 1:2:2, respectivamente. Con estas proporciones se obtienen

densidades medias de 250 a 350 kg/m<sup>3</sup>. La tabla 3.2 muestra las cantidades utilizadas.

Tabla 3.2: dosificación de las mezclas

<b>Material</b>	<b>1:1.5:1.5</b>	<b>1:2:2</b>
Residuo (gr)	175	140
Cal hidráulica (gr)	262,5	280
Agua (gr)	262,5	280

### 3.3.2 Etapa 2

En base a los resultados obtenidos en la etapa 1, se define la estrategia para abordar la etapa 2, que consiste en confección, curado, la validación método de compactación y los ensayos. Durante esta etapa se confeccionaron un total de 120 probetas, las cuales fueron analizadas a partir de sus propiedades mecánicas.

Con respecto a las mezclas, se trabajaron las dosificaciones señaladas en la tabla 3.3 y 3.4, con el fin de analizar si existe un efecto de la incorporación del residuo de cáñamo.

La figura 3.6 muestra en resumen los detalles de la etapa 2, mostrando el efecto de la incorporación de este último residuo en la densidad de las mezclas

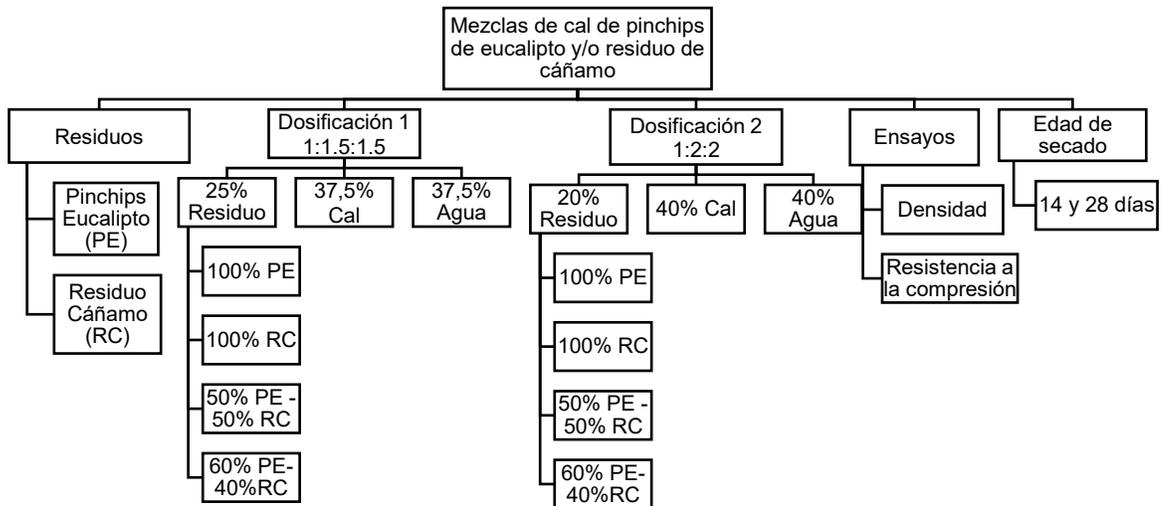


Figura 3.6: Esquema etapa 2

Las dosificaciones de las mezclas para esta etapa se resumen en la tabla 3.3, que corresponde a la proporción 1:1.5:1.5 y en la tabla 3.4, correspondiente a la proporción 1:2:2. Estas proporciones se ajustaron para obtener densidades medias de 250 a 350 kg/m<sup>3</sup>, utilizando una densidad de confección 700 kg/ m<sup>3</sup>.

Tabla 3.3: dosificación de la proporción 1:1.5:1.5

Material	cáñamo virgen	pinchips eucalipto	cáñamo residuo	pinchips 50%- cáñamo residuo 50%	pinchips 60%- cáñamo residuo 40%
Residuo (gr)	175	175	175	87,5 -87,5	105 - 70
Cal (gr)	262,5	262,5	262,5	262,5	262,5
Agua (gr)	262,5	262,5	262,5	262,5	262,5

Tabla 3.4: dosificación de la proporción 1:2:2

Material	cáñamo virgen	Pinchips eucalipto	cáñamo residuo	Pinchips 50%- Cáñamo residuo 50%	Pinchips 60%- cáñamo residuo 40%
Residuo (gr)	140	140	140	70-70	84-56
Cal (gr)	280	280	280	280	280
Agua (gr)	280	280	280	280	280

### 3.3.3 Etapa 3

Finalmente, en la tercera etapa se valida el método de trabajabilidad, considerado los mejores resultados de densidades y resistencia a la compresión, obtenidos en las etapas anteriores.

### 3.3.4 Confección de probetas, trabajabilidad y compactación

Según lo planteado en el punto 3.3.1 se confeccionaron un total de 168 probetas, estimando la proporción de cada material de acuerdo con la cantidad de probetas que se necesitaron confeccionar. Se utilizaron probetas cúbicas de 10 cm de lado, previamente aceitadas. Además, se consideró un 50% más de material debido a las posibles pérdidas que podrían generarse.

Una vez obtenidas las masas correspondientes de cada material necesario para la confección, se procedió al amasado. Inicialmente, se mezcló la cal con el pinchips, luego se incorpora el agua, mezclando aproximadamente por 5 minutos, hasta que el pinchips se encuentren completamente cubiertos.

La mezcla se deja reposar aproximadamente por tres minutos, mientras se medía la trabajabilidad. Después de este tiempo, se volvió a incorporar la mezcla y se mezcló finalmente por un minuto más.

Al finalizar este proceso, fue necesario introducir la mezcla en los moldes cúbicos, incorporando el material en una capa uniforme.

### **3.3.5 Trabajabilidad de la mezcla**

Se desarrolló un método propio de evaluación de trabajabilidad a partir de un equipo diseñado para medir esta propiedad (ver Figura 3.7) el cual consiste en un vástago que sostiene una esfera de acero, la cual desciende de una altura de 10 cm. Este método se basó en el uso de la mezcla óptima como referencia.

Para evaluar esta metodología, se inició con la reducción de agua en la trabajabilidad, se llevaron a cabo una serie de pruebas. Inicialmente, se comenzó con un 50% menos de agua en comparación con la mezcla óptima. Luego, se aumentó gradualmente en incrementos del 25% hasta alcanzar el 100% de la cantidad requerida de agua para obtener la mezcla óptima. Posteriormente, se continuó aumentando en incrementos del 25% cuando la mezcla tenía un exceso de agua.



Figura 3.7: (a) Equipo de trabajabilidad; (b) altura de descenso; (c) profundidad de descenso

### 3.3.6 Compactación de probetas

El equipo de compactación se diseñó (ver figura 3.8) para su uso en probetas pequeñas de laboratorio. Dado que se desconoce la presión de compactación que ejercen en terreno, se tomó de referencia lo indicado por Viel et al (2020), donde aplico diferentes presiones.

Para la compactación de probetas, se diseñó una placa de acero de 95 mm x 95 mm y 4,8 kg de peso, cuya presión teórica corresponde a 0,05 MPa aplicada a cada probeta durante 1 minuto. Posteriormente, se midió y se comprobó que las resistencias y densidades eran iguales a la propuesta por Cerezo (2005).

Durante la segunda etapa, se confeccionaron mezclas basadas en cal de cáñamo virgen, utilizando la granulometría señalada en el punto para validar el método de compactación.

Finalmente, se consideró el mismo procedimiento para el resto de las mezclas basadas en cal de pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo.

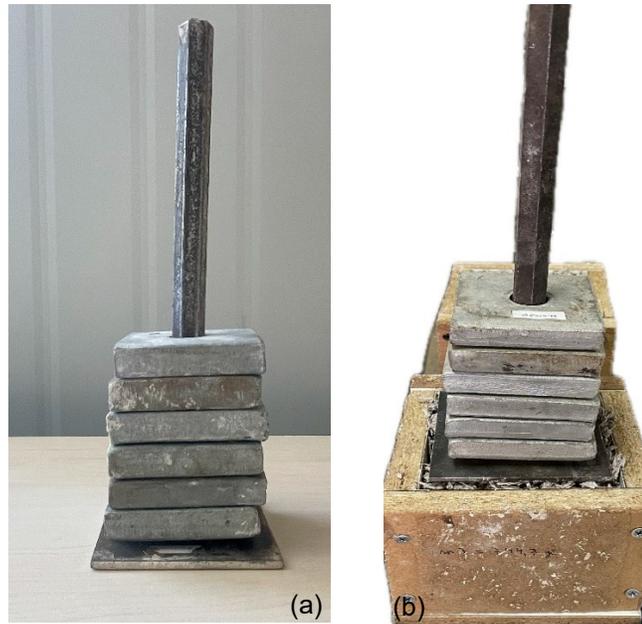


Figura 3.8: (a) equipo compactador; (b) compactación de probeta

Una vez finalizado la compactación de las probetas por 1 minuto, se dejan secar hasta alcanzar las edades de ensayo correspondientes 14 y 28 días a 20 °C y 50% humedad relativa. Esto se debe a que es necesario un buen secado debido al bajo nivel de compactación de las mezclas.

### 3.3.7 Secado de probetas

El hempcrete necesita ser secado en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, de acuerdo con estudios realizados las condiciones óptimas son 20°C y 50% de humedad relativa (Chabannes et al., 2015; De Bruijn P, 2008; Dhakal et al., 2017; Ip & Miller, 2012; Lupu et al., 2022; Somé et al., 2018).

Para efectos de esta investigación, el secado se realizó en una incubadora de temperatura y humedad constante modelo BJPX-HT 150 (ver figura 3.9) de la

marca biobase, ubicada en el laboratorio de hormigón de la Universidad de Concepción.



Figura 3.9: Incubadora BIOBASE con condiciones controlada de humedad y temperatura  
(Fuente: ALPHAOMEGA Electronics)

### 3.4 Evaluación de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó de acuerdo con la NCh1037 (Instituto Nacional de Normalización, 2009) basada en la norma ASTM C39 (American Society for testing and Materials, 2005), utilizando probetas cubicas de 10 cm. Previo a cada ensayo se realizaron las mediciones correspondientes de las probetas.

Se realizo el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 y 28 días para observar la evolución del desarrollo de la resistencia. Se realizaron seis probetas para cada edad de ensayo.

Se utilizó una prensa manual en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción, donde la velocidad de carga depende del usuario, que se realiza en intervalos regulares. (ver figura 3.10).



Figura 3.10: Probeta ensayada a resistencia a la compresión

### 3.5 Cuantificación de impacto ambiental de las mezclas desarrolladas

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que toma en consideración todos los aspectos ambientales que ocurren a lo largo de la vida de un producto, permitiendo entregar información estratégica para un verdadero desarrollo sustentable (Pochettino, 2019). Por otra parte, el Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA) es un tipo de análisis de ciclo de vida simplificado que está enfocado en comparar dos alternativas, pero realizando los cálculos sólo en sus diferencias (Vogtländer, 2012).

La normativa ISO14040 propone una metodología de análisis de ciclo de vida, la cual consta de 4 etapas. Estas etapas no son secuenciales, ya que se permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesiones iterativas. La figura 3.11 muestra el Streamlined la línea segmentada de color rojo utilizado para esta investigación, donde se consideró adquisición de materia prima, producción del material y fabricación del producto, ya que en estas etapas existen diferencias importantes a considerar durante el Análisis.

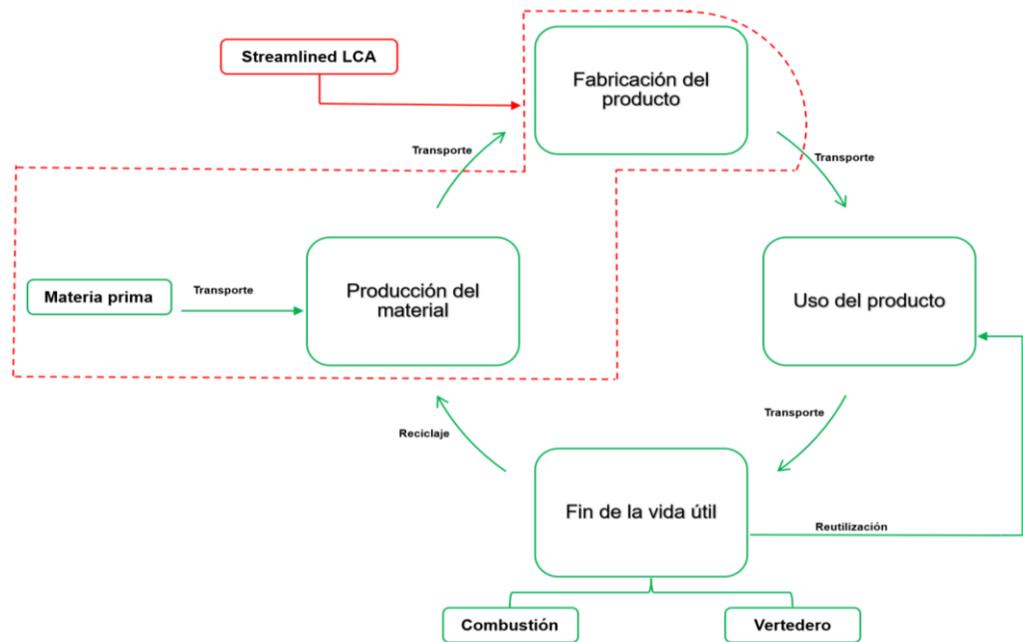


Figura 3.11: Streamlined Análisis Ciclo de Vida del producto.

### **3.5.1 Definición del objetivo y alcance del estudio**

En esta etapa se incluye la definición del sistema a estudiar, los límites y objetivos del estudio. También es importante definir la unidad funcional del sistema analizado, ya que un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios y/o cantidades del producto que tengan la misma función.

El objetivo de esta investigación es analizar los impactos ambientales del pinchips de eucaliptus, madera de cáñamo y las mezclas de estos, para las siguientes proporciones 1:1,5:1,5, 1:2:2. La unidad funcional del estudio corresponde a la confección de un metro cubico de mezclas.

Para cada comparación de sustitución de la cal se definió un sistema de la cuna a la puerta, considerando equivalentes las etapas de uso del producto y disposición final.

### **3.5.2 Análisis de inventario (ICV)**

Corresponde a la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional, realizando un inventario por unidad producida del flujo de recursos que entran en el sistema y del flujo de emisiones que salen. Cuando se trabaja con un sistema que tiene varios productos, es importante asignar los flujos de materia y energía, y las emisiones al medio ambiente que está asociado a cada subproducto.

Un análisis de inventario comienza con la adquisición de materia prima y finalizar con la retirada del producto una vez finalizada su vida útil, pasando por la

producción, embalaje y distribución del producto acabado y por la etapa de uso, reutilización y mantenimiento. Un ACV requiere una gran cantidad de datos que provienen de diferentes bases de datos, es por esto por lo que la calidad del análisis dependerá principalmente de la información proporcionada al inicio del estudio. Existe una base de datos ambientales chilena llamada ÁBACO, pero las entradas y salidas de esta base están introducidas dentro de ciertas categorías, por lo que no se tiene el detalle exacto en cuanto a las emisiones totales al aire, suelo y agua. Además, existen datos como los asociados al consumo eléctrico que están basados en base a datos internacionales (García, 2022). Por esta razón, en esta investigación se utilizará bases de datos de origen europeo, debido a la falta de ICV desarrolladas específicamente para Chile (Bunster & Bustamante, 2020).

Las bases de datos utilizadas corresponden a la European Reference Life Cycle Data base (ELCD) desarrollada por el Joint Research Center el año 2015, AGRIBALYSE y ECOINVENT.

La primera comprende datos del inventario de ciclo de vida de asociaciones comerciales a nivel de la Unión Europea y otras fuentes de materiales claves, vectores de energía, transporte y gestión de residuos.

La segunda comprende datos del inventario de ciclo de vida del sector agrícola y alimentario proporcionado por ADEME en Francia.

La tercera comprende datos realizados por cinco institutos de investigación suizos que proporciona datos bien documentados para miles de productos a nivel mundial.

### 3.5.3 Análisis del impacto (AICV)

El inventario entrega una lista de recursos consumidos y emisiones, por lo que el objetivo de esta etapa es evaluar la importancia de los impactos ambientales utilizando los datos entregados en la etapa anterior. Los resultados de esta etapa pueden utilizarse para identificar oportunidades de mejora, caracterizar o comparar sistemas diferentes de producto e identificar variables medioambientales críticas (Fayos Ortega, 2013).

Para este estudio se utilizó el programa computacional de uso gratuito Open LCA en su última versión disponible (1.10.3), el cual fue desarrollado por la compañía GreenDelta.

Para la etapa de evaluación del impacto ambiental se utilizó la herramienta TRACI 2.1, desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Una de las ventajas de esta herramienta es el amplio espectro de impactos cubiertos y la aplicabilidad a nivel nacional (Cifuentes, L; Cabrera, C; Lapuente, 2017) . Las categorías de impacto y unidad de referencia utilizada en la metodología TRACI 2.1 se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Categorías de impacto

<b>Impacto</b>	<b>Unidad de referencia</b>
Acidificación	Kg SO2 eq
Ecotoxicidad	CTUe
Eutroficación	Kg N eq
Calentamiento Global	Kg CO2 eq
Salud Humana-Carcinógenos	CTUh
Agot. Combustibles Fósiles	MJ surplus
Salud Humana- No Carcinógenos	CTUh
Agotamiento del ozono	Kg CFC-11 eq
Formación de ozono fotoquímico	Kg O3eq
Efectos respiratorios	Kg PM2.5 eq

La metodología de cálculo de impacto de cada categoría corresponde a la ecuación que se muestra a continuación, en donde cada impacto tiene un indicador general el cual se relaciona directamente con la emisión de cada uno de los contaminantes considerados.

$$I^i = \sum_{xm} CF_{xm}^i \times M_{xm}$$

Donde,

$I^i$ : Potencial de impacto de todos los químicos  $x$  para una categoría de impacto  $i$ .

$CF_{xm}^i$ : Factor de caracterización del químico  $x$  emitido en un medio  $m$  para la categoría de impacto  $i$ .

$M_{xm}$ : Masa del químico  $x$  emitido al medio  $m$ .

### 3.5.4 Interpretación de los resultados

En esta etapa se combinan los resultados del análisis de inventario con el análisis del impacto, entregando conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y el alcance del estudio.

También en esta fase es posible identificar en cual etapa del ciclo de vida se producen las mayores cargas ambientales, por lo tanto, con esta información se puede conocer que puntos del sistema deben mejorarse. Si en el ACV se comparan distintos productos es aquí donde se determina cual presenta un mejor comportamiento ambiental.

### **3.6 Conclusión**

En este capítulo se estableció la metodología a utilizar en esta investigación de forma detallada para cada procedimiento. Se definieron los materiales, estrategias de trabajabilidad y compactación. Además de las variables consideradas.

Se establece una estrategia de compactación que es uno de los aspectos de mayor influencia en este tipo de aislante, difiere considerablemente.

Sin embargo, los estudios técnicos están ligados con los ambientales. Para ello la evaluación de análisis de ciclo de vida del producto.

En este capítulo se definieron los materiales utilizados y las variables consideradas para los ensayos realizados en la verificación experimental.

Además, se presentaron las dosificaciones utilizadas para la elaboración de las mezclas y los procedimientos para la confección de las probetas y realización de los ensayos. Sin embargo, los estudios técnicos están ligados con los ambientales. De esta manera se analizan los impactos de las diferentes mezclas desarrolladas con beneficios técnicos y ambientales.

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de residuos, diseños de mezclas, densidades y resistencia a la compresión realizados en la verificación experimental del pinchips. La nomenclatura utilizada está asociada a la serie a la que pertenece el experimento, lo cual se definió en el punto 3.3 de la metodología. Los resultados obtenidos por probeta para los diferentes ensayos efectuados se presentan en los anexos 4.1 al 4.4.

El capítulo se divide en cuatro secciones, donde cada una está asociada a un objetivo específico.

### **4.2 Caracterización de residuos**

#### **4.2.1 Propiedades físicas y químicas Pinchips de eucalipto y Cábano**

La tabla 4.1 entrega los resultados de las propiedades físicas del residuo de cáño y pinchips de eucalipto. Se observó que la madera de cáño tiene una densidad aparente de 90 (kg/m<sup>3</sup>), mientras que el pinchips de eucalipto de 170 (kg/ m<sup>3</sup>). Esto hace que el residuo de cáño sea aproximadamente la mitad más liviano, lo cual se debe principalmente a la altura que alcanzan ambos, durante su proceso de crecimiento.

En cuanto a la capacidad de retención de agua, se observa que el cáño absorbe un 40% más de agua que pinchips de eucalipto. Este resultado era esperable, debido a que ambos poseen características físicas similares en lo que respecta a la porosidad.

Tabla 4.1: Propiedades físicas de la madera de cáñamo y el pinchips de eucalipto.

		Cáñamo	Pinchips de eucalipto	Cáñamo literatura
Densidad aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	90	170	100 - 110
Espacio poroso	(%)	83	84	89
Capacidad retención agua				
Base masa	(%)	230	190	230

La figura 4.1 (a) muestra el residuo de cáñamo, mientras que la figura 4.1 (b) presenta pinchips de eucalipto, detallando gráficamente la microestructura en la misma escala, lo que válida la similitud en la porosidad dentro de las propiedades físicas. (Ver anexo 4.1)

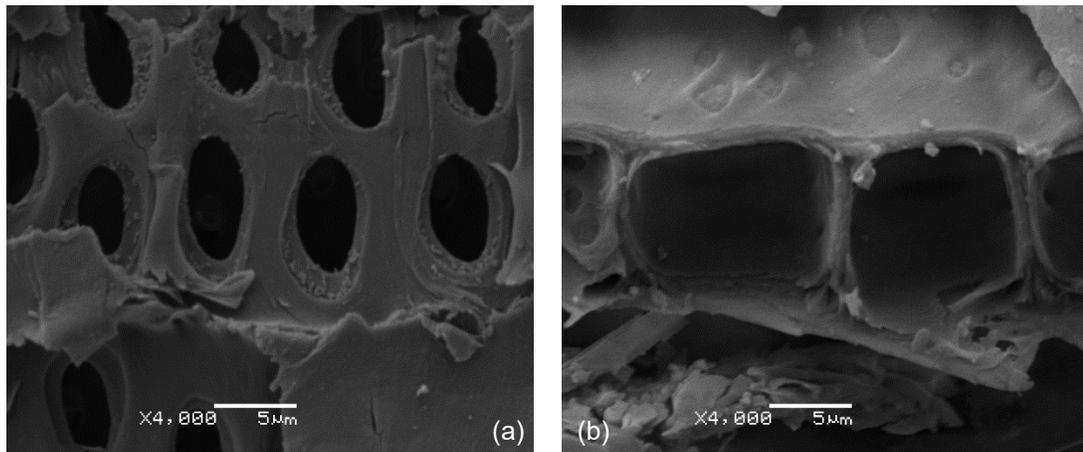


Figura 4.1: imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM); (a) residuo de cáñamo; (b) pinchips de eucalipto.

La tabla 4.2 presenta los resultados de las propiedades químicas del residuo de cáñamo y pinchips de eucalipto. La composición química es similar en ambos casos, lo que permite concluir que las propiedades mecánicas no dependen de la composición química del residuo, más bien de las propiedades físicas como densidad aparente, capacidad de absorción.

Tabla 4.2: Composición química de la madera de cáñamo y el pinchips de eucalipto.

		<b>Residuo de cáñamo</b>	<b>Pinchips de eucalipto</b>
pH		6,4	5,9
C. eléctrica	(dS/m)	0,76	0,72
Materia Orgánica	(%)	99	100
Carbono Orgánico	(%)	55	55,6
Nitrógeno total	(%) N	0,22	0,36
Relación	C/N	250	154
Fosforo total	(%) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,07
Potasio total	(%) K <sub>2</sub> O	0,07	0,08
Humedad	(%)	7	25
Materia seca	(%)	93	75

#### **4.2.2 Características granulométricas pinchips de eucalipto, residuo y combinaciones**

La figura 4.2 compara dos curvas típicas del cáñamo en el hempcrete, junto a los utilizados durante el desarrollo de esta investigación.

Con respecto al 100% residuo de cáñamo, cumplen con las características de una distribución granulométrica establecida por Bumanis et al (2022) y Viel et al (2019).

Con respecto, al 100% de pinchips de eucalipto, se encuentra dentro del límite inferior que corresponde a lo propuesto por Viel et al (2019).

Por otra parte, al comparar la distribución granulométrica con distribuciones obtenidas de literatura se observa que la mezcla 50% pinchips eucalipto - 50% residuo de cáñamo y 60% pinchips de eucalipto– 40% residuo de cáñamo, se encuentran dentro de los rangos superior establecido por Bumanis et al (2022) e inferior propuesto por Viel et al (2019).

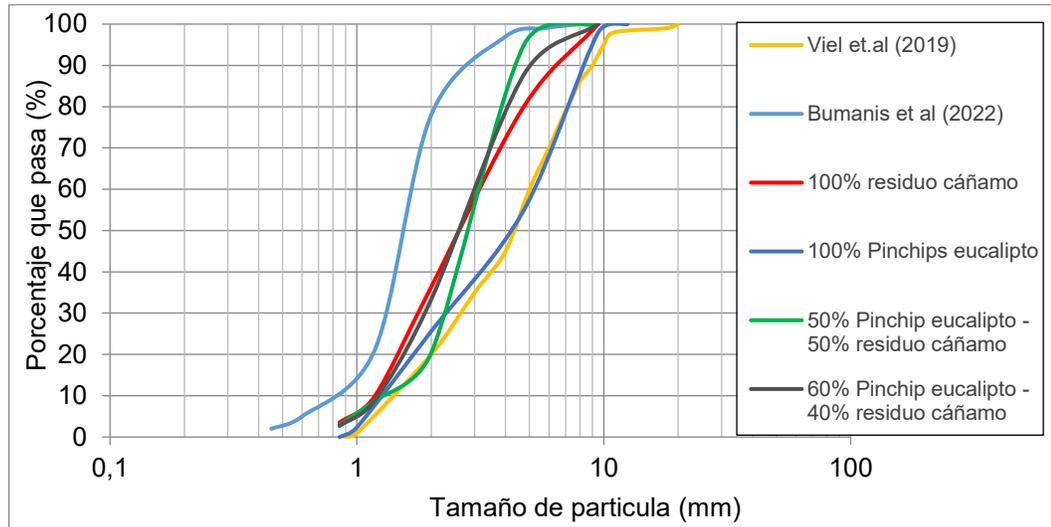


Figura 4.2: Comparación de curvas granulométricas entre la madera de cáñamo y los residuos

Brzyski et al., (2020), señalan que longitudes mayores a 30 mm de cáñamo presentan dificultades durante el proceso de mezclado y disposición final de las mezclas. Incluso Walker et al., (2014) indican que esto requeriría una compactación más fuerte, lo que afectaría la reducción de las propiedades de aislamiento térmico.

### 4.3 Resultados de trabajabilidad

La tabla 4.3, representa los resultados promedios de trabajabilidad para la proporción 1:1.5:1.5 con los diferentes incrementos de agua. Se realizaron 6 mediciones en las mezclas estudiadas. Al considerar un 50% de agua menos de agua, el descenso promedio fue de entre 2,08 y 3,08 cm. Cuando la mezcla tenía la cantidad óptima de agua, el descenso fue aproximadamente 4 a 4,5 cm, y al considerar un exceso del 50% más de lo necesario, el descenso fue de 5,17 a 5,92 cm.

La tabla 4.4 representa los resultados promedios de trabajabilidad para la proporción 1:2:2 con diferentes incrementos de agua. Se realizaron 6 mediciones en las mezclas estudiadas. Al considerar un 50% menos de agua, el descenso promedio fue de entre 3,15 y 3,33 cm. Cuando la mezcla tenía la cantidad óptima de agua, el descenso fue de aproximadamente 4,42 a 4,66 cm, y al considerar un exceso de agua del 50% más de lo necesario, el descenso fue entre 6,17 y 6,33 cm.

Cabe destacar que en ambas proporciones de mezclas existen diferencias significativas entre una mezcla seca y una con la cantidad adecuada de agua. Es importante tener en consideración estos valores, ya que una mezcla con menos de la mitad de agua necesaria no existirá adherencia entre partículas y aglutinante.

Tabla 4.3: Resultados prueba de trabajabilidad proporción 1:1.5:1.5

Cantidad de agua	pinchips eucalipto	cáñamo residuo	pinchips 50%-cáñamo residuo 50%	pinchips 60%-cáñamo residuo 40%
50% agua	3,00	2,08	2,25	3,08
75% agua	3,5	2,33	3,16	3,5
100% agua	4	4	4,25	4,5
125% agua	4,42	4,75	4,42	4,42
150% agua	5,17	5,92	5,17	5,17
200% agua	6,17	7,83	6,17	6,67

Tabla 4.4: Resultados prueba de trabajabilidad proporción 1:2:2

Cantidad de agua	pinchips eucalipto	cáñamo residuo	pinchips 50% -cáñamo residuo 50%	pinchips 60%-cáñamo residuo 40%
50% agua	3,15	3,33	3,17	3,17
75% agua	3,75	4,08	3,66	3,33
100% agua	4,42	4,58	4,5	4,66
125% agua	5,33	5,75	5,25	5,17
150% agua	6,17	6,33	6,17	6,17
200% agua	7,17	8,17	7,5	7,50

#### 4.4 Resultados de compactación

A partir de la figura 4.3, que representa la curva granulométría del cáñamo virgen utilizado para validar el método de compactación, se pueden observar los resultados de validación del método de compactación propuesto en esta investigación los cuales se presentan en la figura 4.3. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

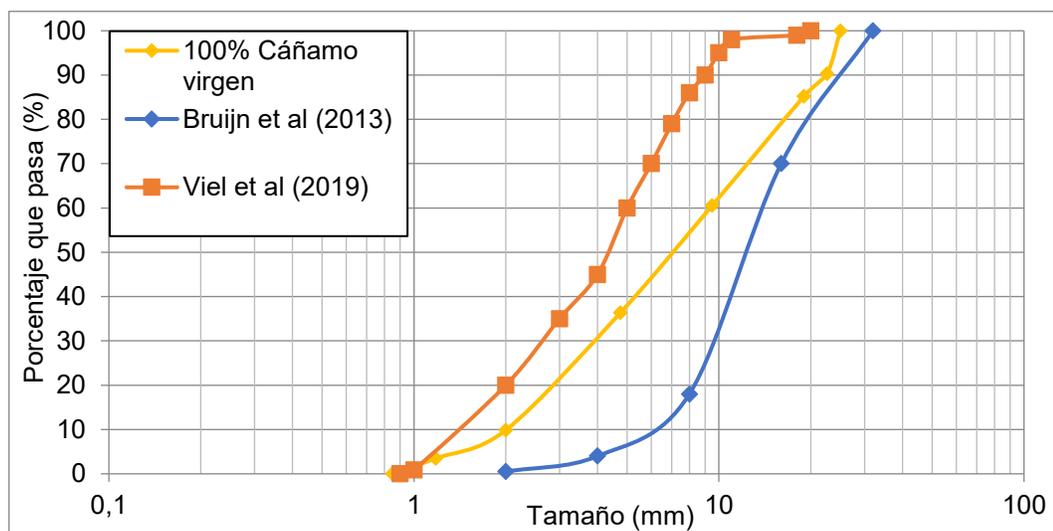


Figura 4.3: comparación de curvas granulométrica cáñamo virgen versus curvas de literatura

Se observa en la figura 4.3 que el cáñamo virgen se encuentra dentro del rango inferior y superior establecidos por los autores, por lo tanto, el método de compactación propuesto es válido para este tipo de granulometría.

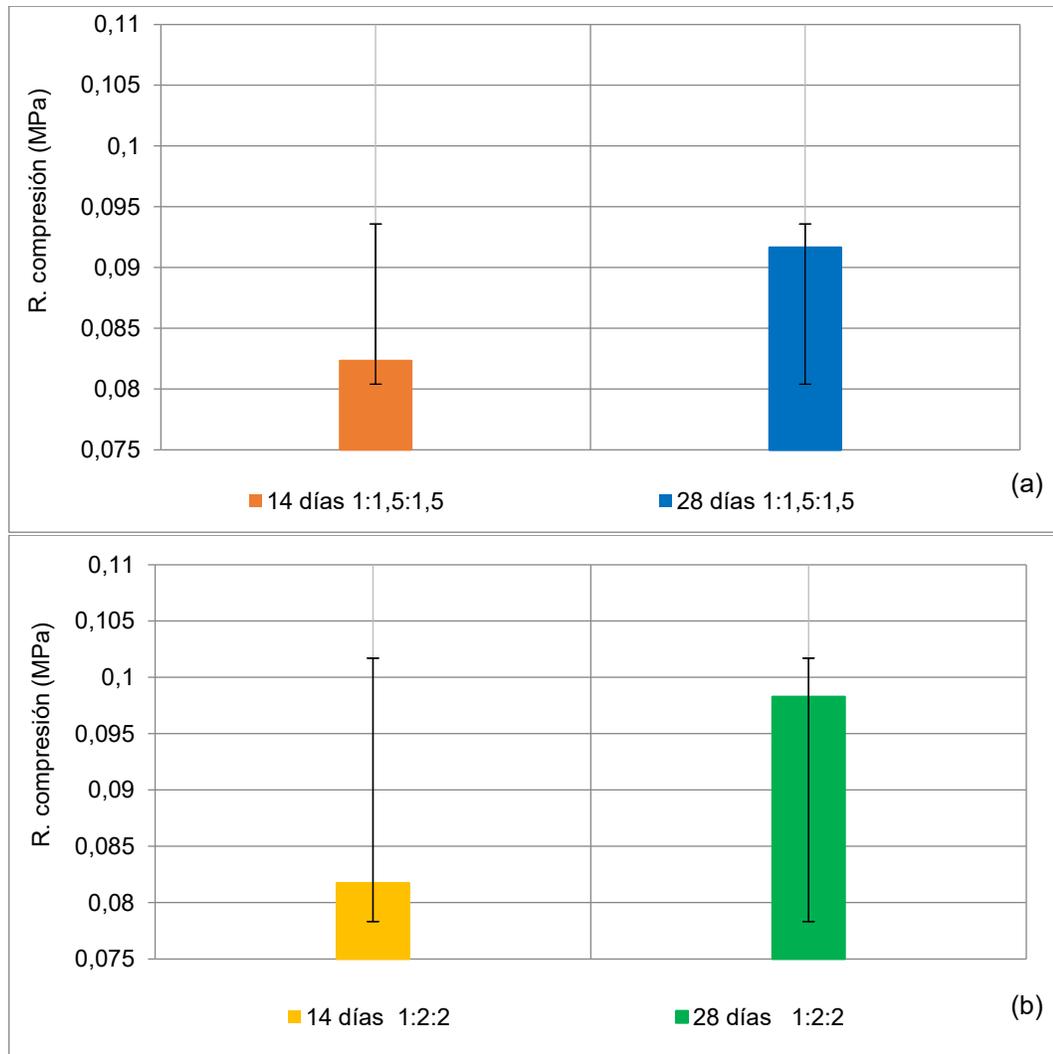


Figura 4.4: Propiedades mecánicas (a) resistencia a la compresión mezcla 1:1,5:1,5, (b) resistencia a la compresión mezcla 1:2:2.

La figura 4.4 (a) representa la mezcla 1:1,5;1,5 de resistencia que va desde 0,082 a 0,091 MPa, mientras que la figura 4.4 (b) representa la variación para la mezcla 1:2:2, y la resistencia a la compresión va desde 0,081 a 0,098 MPa.

En ambos casos la mayor resistencia se obtiene con la mezcla que tiene 28 días de secado.

Las densidades obtenidas se representan en la figura 4.5 (a) y (b) para la mezcla 1:1.5:1.5 a los 14 y 28 días fueron de

Con respecto a la densidad, se realizó una medición del volumen de las probetas desde el día de confección y se llevó el registro de la masa a los 0, 3, 7, 14 y 28 días respectivamente. En la figura 4.5 (a), (b), (c), (d), se presenta una serie de curvas, cada una corresponde a una probeta con diferentes edades de secado. Se obtuvieron resultados que son representados en la figura 4.5 (a) el rango de densidades a los 14 días demuestra una pendiente con descenso pronunciado durante los primeros días.

Con respecto a la figura 4.5(b) el rango de densidades las seis probetas durante los primeros 21 días presenta un descenso pronunciado, posterior a esos días, es menor comparado con los primeros días.

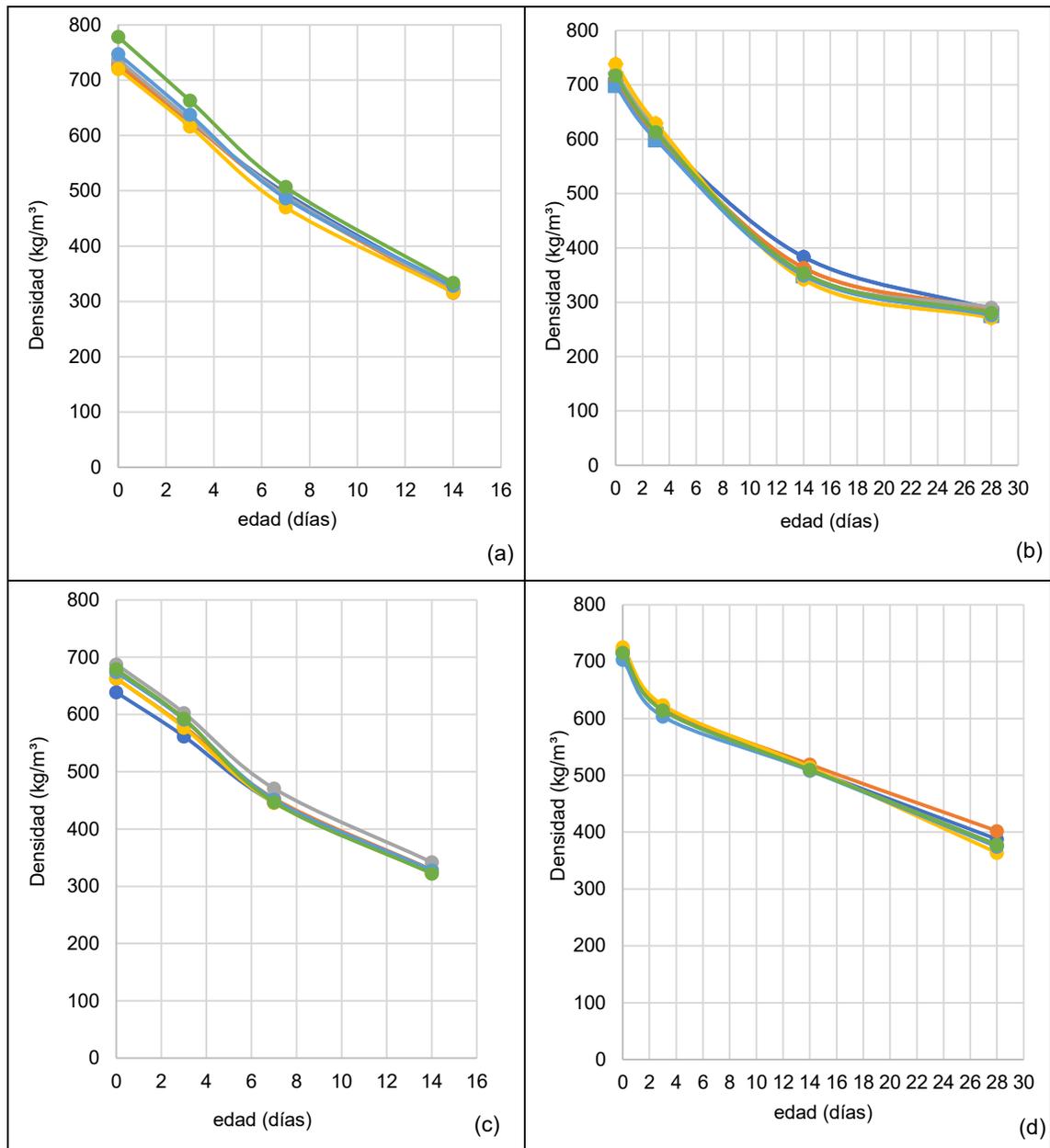


Figura 4.5: (a) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (b) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5; (c) densidad a los 14 días mezcla 1:2:2; (d) densidad a los 28 días mezcla 1:2:2

Por lo tanto, la presión aplicada en las mezclas propuesto en esta investigación es válido para este tipo de mezclas de cáñamo virgen, ya que la resistencia a la compresión y densidad entregadas en ambas mezclas, son similares con los establecido por los autores

## 4.5 Resultados de propiedades mecánicas

### 4.5.1 Etapa 1

Los resultados de propiedades mecánicas de la etapa 1 de esta investigación se presentan en la figura 4.6. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las repeticiones.

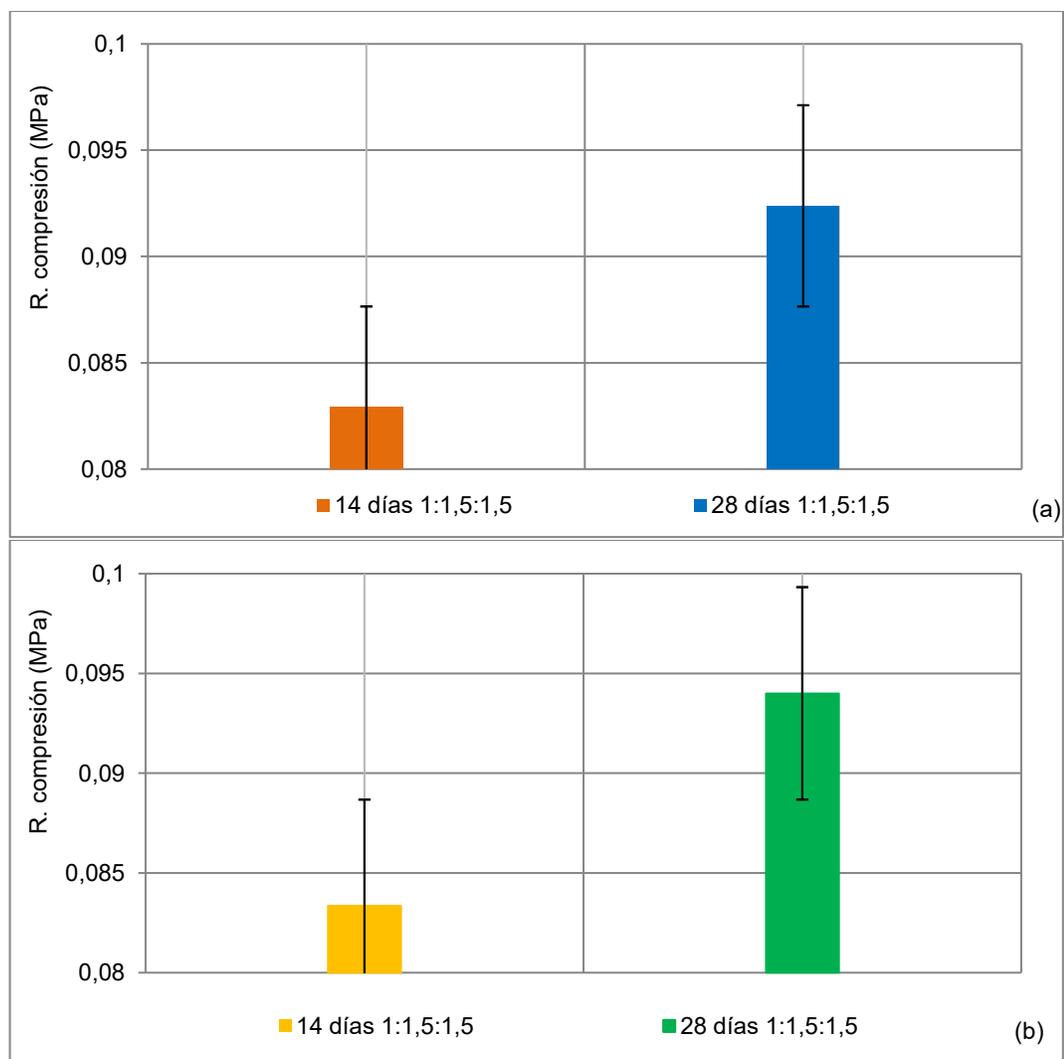


Figura 4.6: (a) densidad de confección 700 kg/m³; (b) densidad de confección 500 kg/m³.

La figura 4.6 (a) representa la variación para la mezcla 1:1,5;1,5 de resistencia que va desde 0,083 a 0,092 MPa., para una densidad húmeda de confección de 700 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la figura 4.6 (b) representa la variación para la mezcla 1:1,5:1:1.5, en esta la resistencia a la compresión va desde 0,081 a 0,098 MPa, para una densidad de confección de 500 kg/m<sup>3</sup>. En ambos casos la mayor resistencia se obtiene con la mezcla que tiene más tiempo de secado.

Otro aspecto para señalar es que durante estas mezclas se realizaban con el pinchips que tenía aproximadamente 95%, otro factor a considerar ya que existía más agua en la mezcla que la requerida y es un factor en la disminución de resistencia y aumento en la densidad.

Con respecto a la densidad, se realizó un registro de masas de las probetas desde el día de confección y se llevó el registro de la masa a los 0, 3, 7, 14 y 28 días respectivamente. En la figura 4.7 (a), (b), (c), (d), se presenta una serie de curvas, cada una corresponde a una probeta con diferentes tiempos de secado. Se obtuvieron resultados que son representados en la figura 4.7(a) el rango de densidades a los 14 días demuestra una pendiente con descenso pronunciado durante los primeros días. Con respecto a la figura 4.7(b) el rango de densidades a los 28 días de secado y los primeros 21 días presenta un descenso pronunciado, posterior a esos días, es menor comparado con los primeros días.

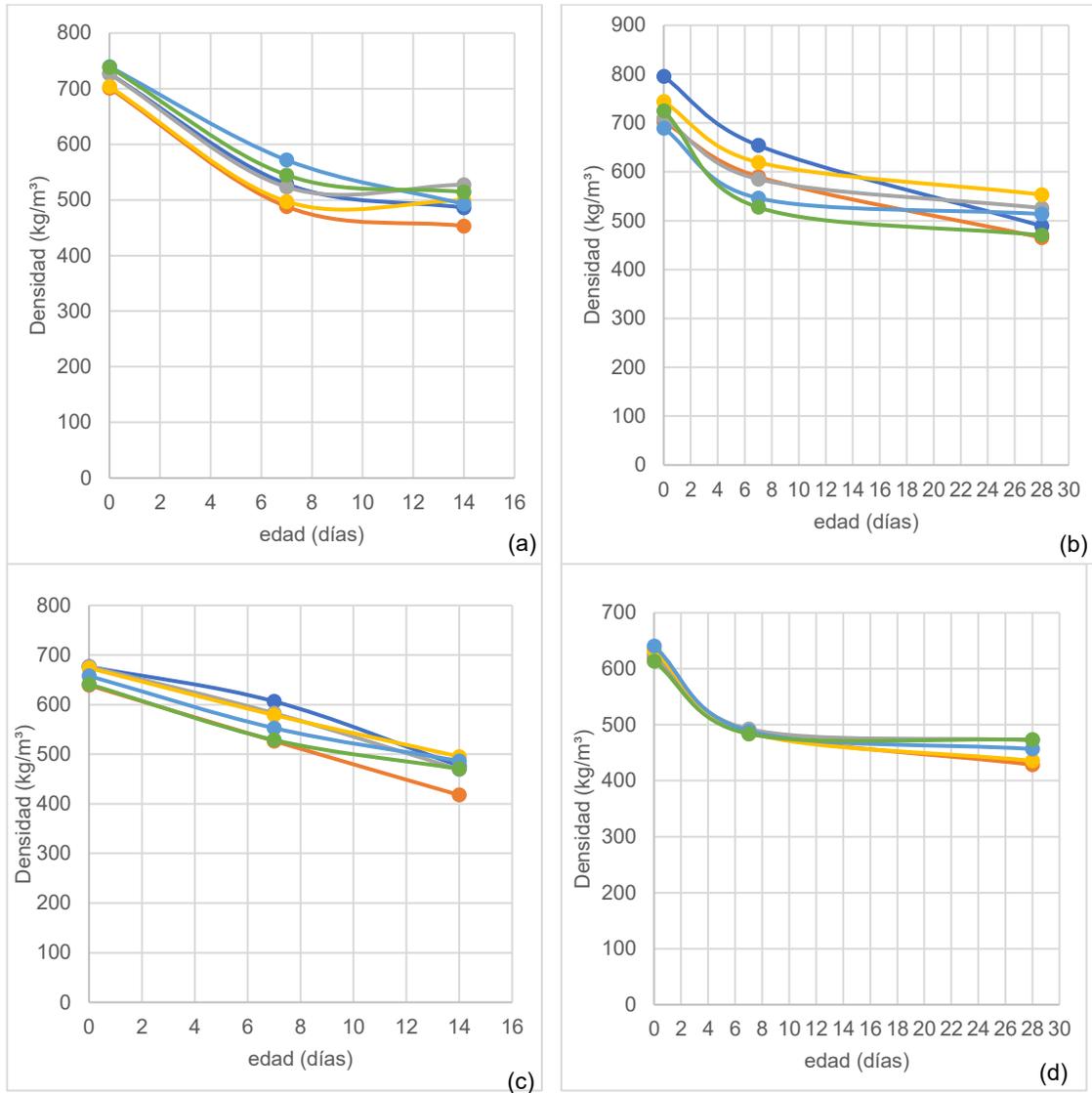


Figura 4.7: (a) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (b) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5; (c) densidad a los 14 días mezcla 1:1,5:1,5; (d) densidad a los 28 días mezcla 1:1,5:1,5

La figura 4.8 (a) representa la variación para la mezcla 1:2:2 de resistencia que va desde 0,091 a 0,096 MPa., para una densidad húmeda de confección de 700 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la figura 4.8 (b) representa la variación para la mezcla 1:2:2, en esta la resistencia a la compresión va desde 0,087 a 0,098 MPa.

En ambos casos la mayor resistencia se obtiene con la mezcla que tiene más tiempo de secado, si bien la resistencia es menor a las encontradas en literatura existente, esto se debe a que la cal es un material anisotrópico.

Otro aspecto para señalar es que durante estas mezclas se realizaban con el pinchips que tenía aproximadamente 95%, otro factor a considerar ya que existía más agua en la mezcla que la requerida y es un factor en la disminución de resistencia a la compresión.

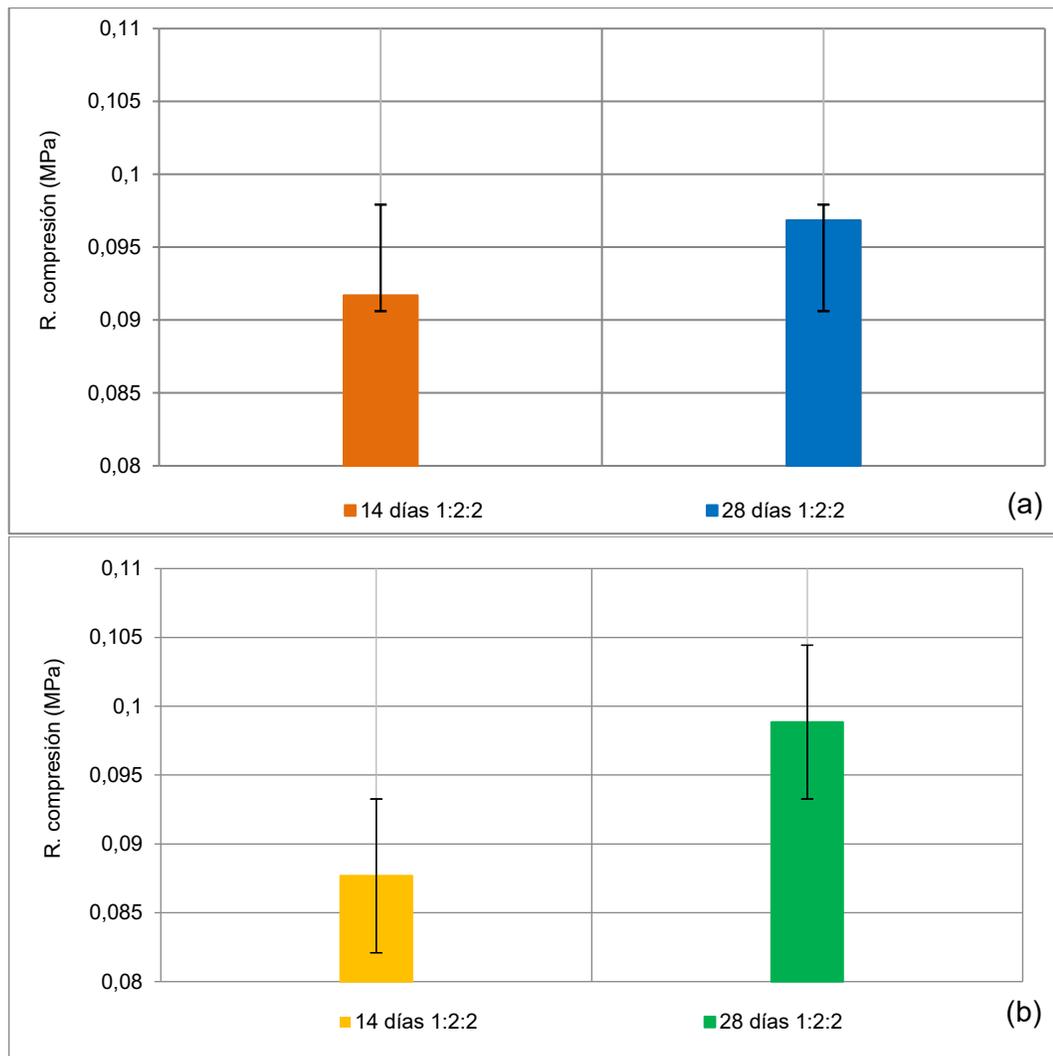


Figura 4.8: (a) densidad de confección 700 kg/m³; (b) densidad de confección 500 kg/m³.

### 4.5.2 Etapa 2

La figura 4.9 (a) representa la variación para la mezcla 1:1,5:1,5 de resistencia que va desde 0,089 a 0,101 MPa, para una densidad húmeda de confección de 700 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la figura 4.9 (b) representa la variación para la mezcla 1:1.5:1.5, en esta la resistencia a la compresión va desde 0,094 a 0,112 MPa. En ambos casos la mayor resistencia se obtiene con la mezcla que tiene más tiempo de secado.

La mezcla basada en cal que contiene 100% pinchips de eucalipto obtiene la mayor resistencia a la compresión a los 14 días que fue de 0,101 MPa, esto se debe a la naturaleza propia del material.

Con respecto, a la mezcla basada en cal de 100% residuo de cáñamo su resistencia a la compresión fue de 0,089 MPa, esto se debe a que el material vegetal posee una baja densidad haciendo que su resistencia en la incorporación de la mezcla sea menor. En cuanto a las resistencias alcanzadas en la figura 4.9(b), las mezclas logran alcanzar mayor resistencia, durante el periodo de secado de las probetas.

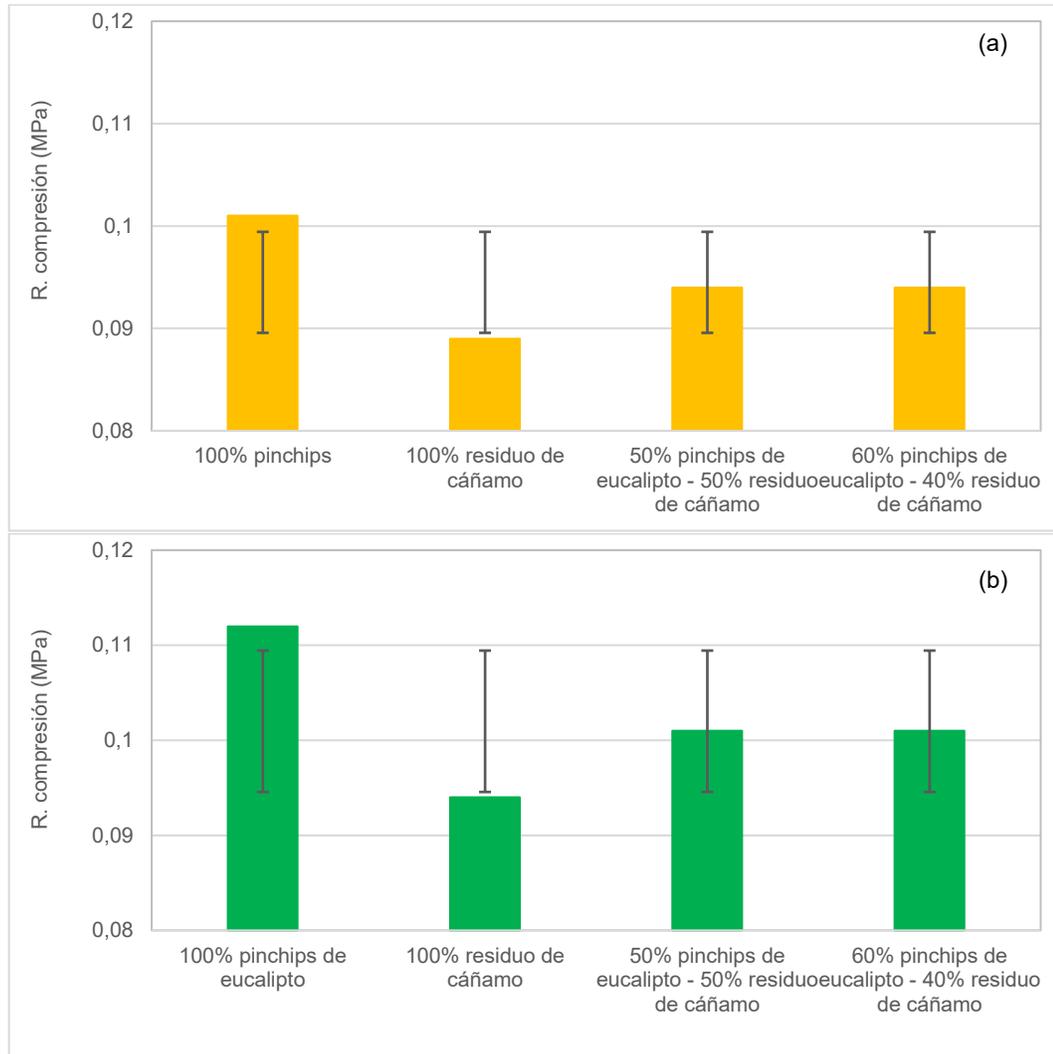


Figura 4.9: Propiedades mecánicas para la mezcla 1:1.5:1.5 (a) resistencia a la compresión a los 14 días (b) resistencia a la compresión a los 28 días.

Con respecto a la densidad, se realizó una medición del volumen de las probetas desde el día de confección y se llevó el registro de la masa a los 0, 3, 7, 14 y 28 días respectivamente. Se obtuvieron resultados que son representados en la figura 4.10(a) el rango de densidades para las seis probetas a los 14 días demuestra una pendiente con descenso pronunciado durante los primeros días. Con respecto a la figura 4.10(b) el rango de densidades las seis probetas durante

los 28 días de secado y los primeros 21 días presenta un descenso pronunciado, posterior a esos días, es menor comparado con los primeros días.

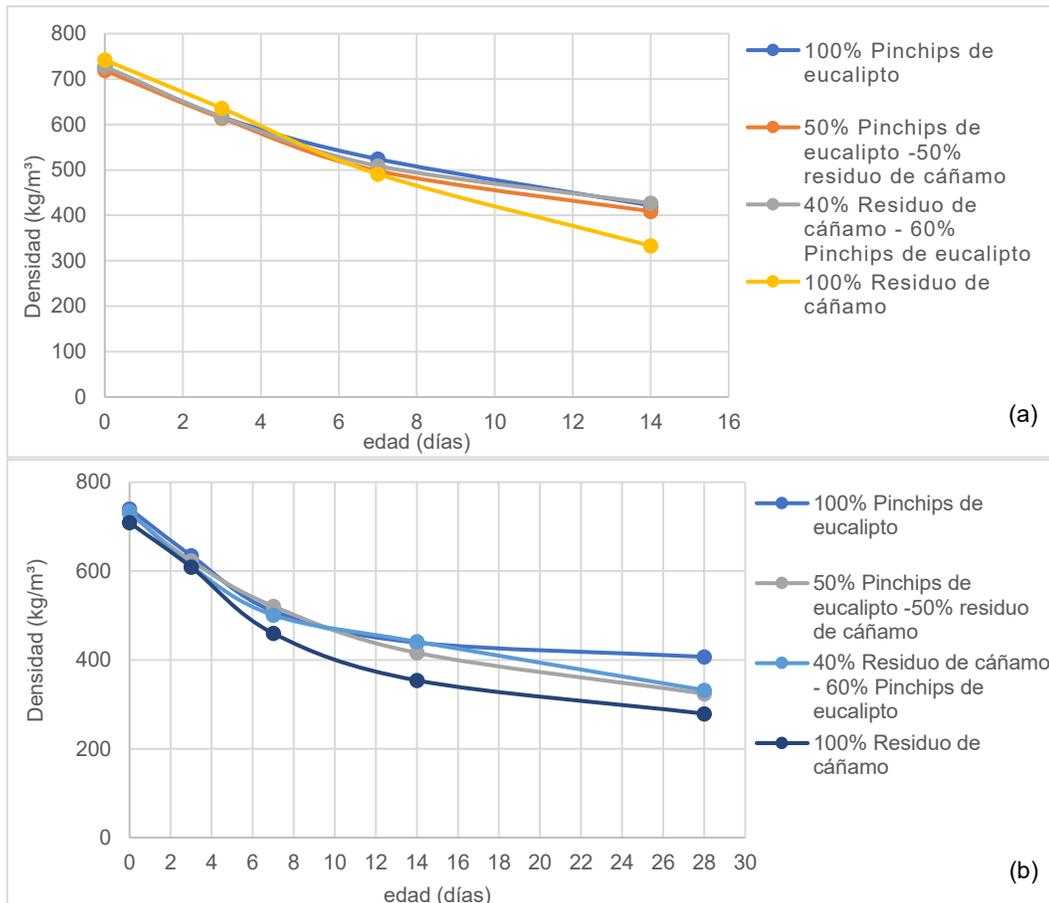


Figura 4.10: determinación densidad para la mezcla 1:1.5:1.5 (a) densidad de las mezclas a los 14 días (b) densidad de las mezclas a los 28 días.

La figura 4.11 (a) representa la variación para la mezcla 1:1,5:1,5 de resistencia que va desde 0,093 a 0,101 MPa., para una densidad húmeda de confección de 700 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la figura 4.11 (b) representa la variación para la mezcla 1:2:2, en esta la resistencia a la compresión va desde 0,104 a 0,107 MPa. En ambos casos la mayor resistencia se obtiene con la mezcla que tiene más tiempo de secado.

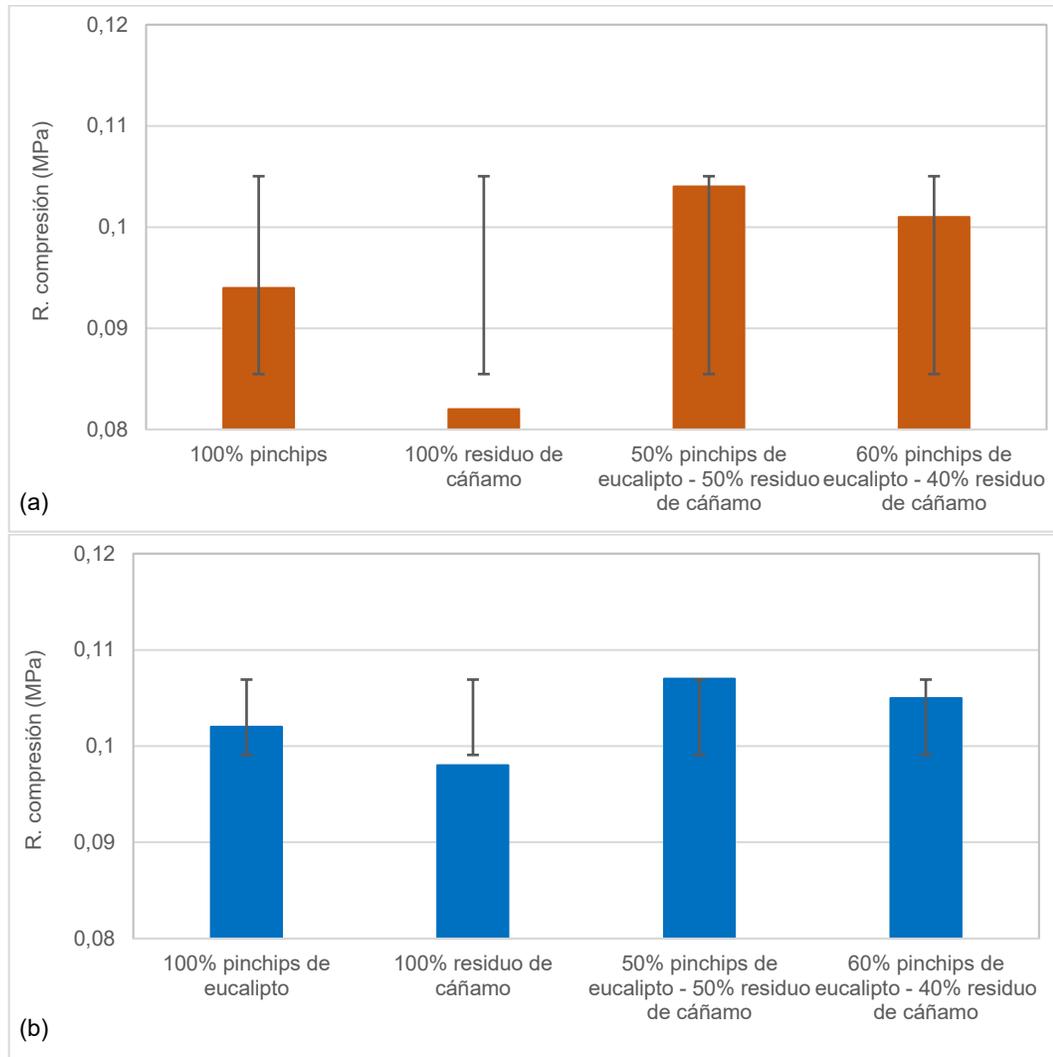


Figura 4.11: Propiedades mecánicas para la mezcla 1:2:2 (a) resistencia a la compresión a los 14 días (b) resistencia a la compresión a los 28 días.

Con respecto a la densidad, se realizó una medición del volumen de las probetas desde el día de confección y se llevó el registro de la masa a los 0, 3, 7, 14 y 28 días respectivamente. Se obtuvieron resultados que son representados en la figura 4.12 (a) el rango de densidades a los 14 días demuestra una pendiente con descenso pronunciado durante los primeros días. Con respecto a la figura 4.12 (b) el rango de densidades durante los 28 días de secado y los primeros 21

días presenta un descenso pronunciado, posterior a esos días, es menor comparado con los primeros días.

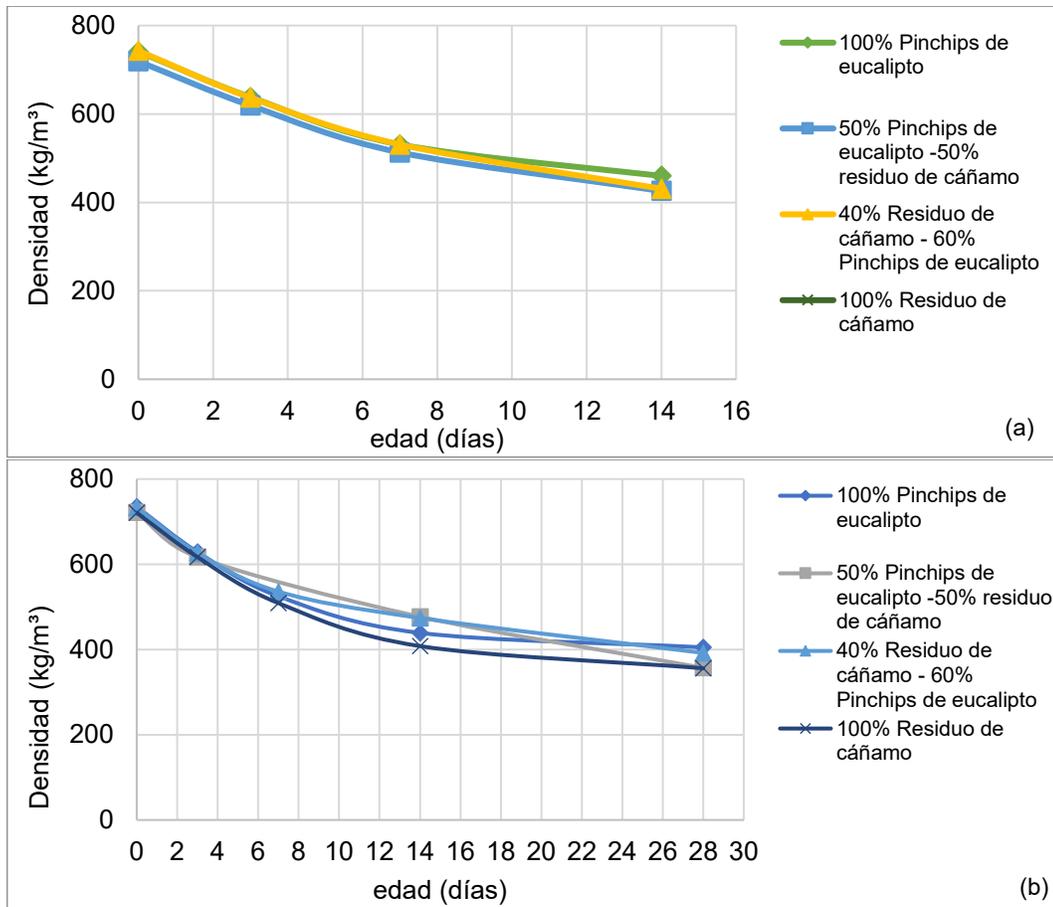


Figura 4.12: determinación densidad para la mezcla 1:2:2 (a) densidad de las mezclas a los 14 días (b) densidad de las mezclas a los 28 días.

### 4.6 Análisis de Ciclo de Vida

Para poder comparar los resultados entregados por el software para las distintas categorías en un mismo gráfico, se normalizo el valor máximo entre las alternativas y los otros se relativizaron al valor máximo. A continuación, se muestran en las figuras 4.13 y 4.14 la comparación de las distintas mezclas.

Los resultados que se obtienen para las categorías de impacto en las distintas alternativas se encuentran en el Anexo 4.4, estos valores fueron obtenidos a través del Software OpenLCA.

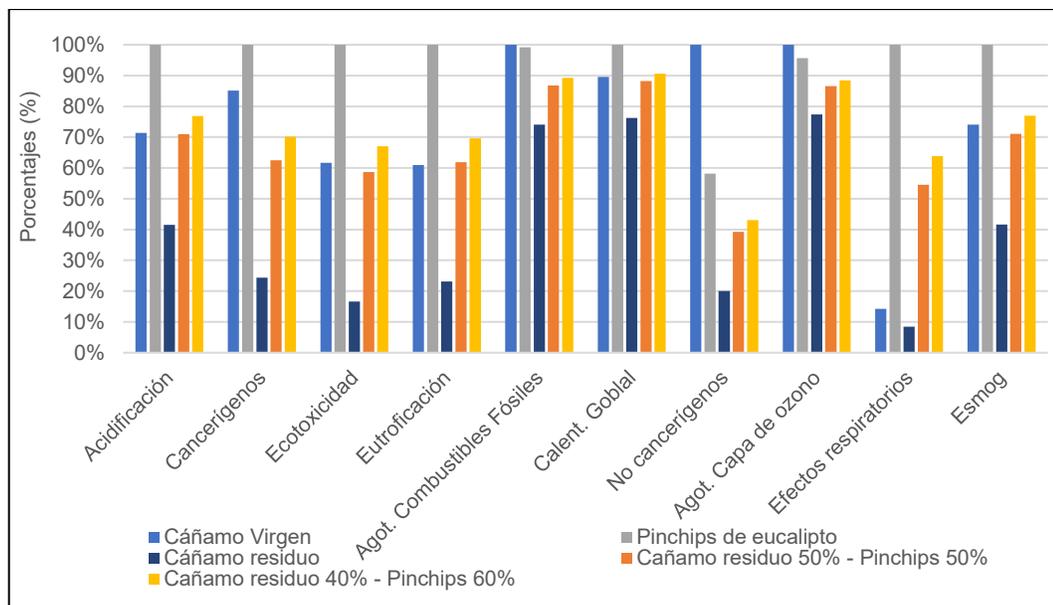


Figura 4.13: Resultados del impacto ambiental para la proporción 1:1,5:1,5

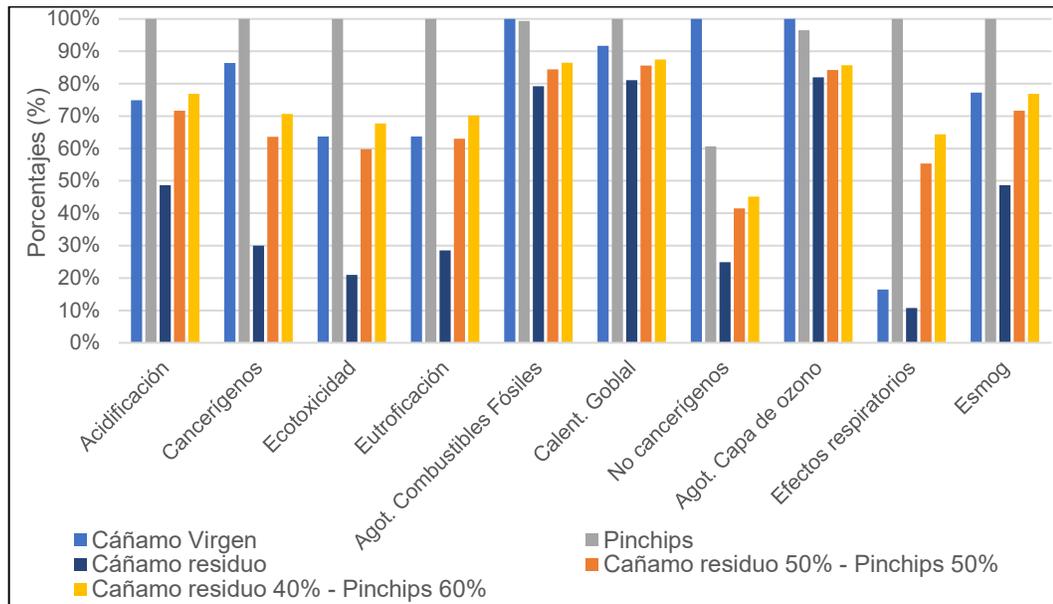


Figura 4.14: Resultados del impacto ambiental para la proporción 1:2:2

Se puede observar que la mezcla basada en cal pinchips de eucalipto es la alternativa menos favorable ambientalmente, que además presenta valores superiores al cálamo virgen de las categorías de impacto estudiadas. Esto se relaciona con el secado del material en un horno y este consumo de electricidad.

En el caso contrario, se encuentra la mezcla basada en cal del cálamo residuo, la cual mostro en la figura 4.13 y 4.14 bajas emisiones en 7 categorías estudiadas que se evalúan respecto al pinchips de eucalipto.

En el anexo 4.4 se presentan los valores y gráficos realizados entregados por el programa de cada categoría de impacto propuestas. Se puede observar que las mezclas en la categoría de Calentamiento Global con mayor emisión en las mezclas estudiadas, se debe principalmente a la utilización de Cal, secado de pinchips de eucalipto y tamizado de cálamo, los cuales estos últimos se encuentran asociado al consumo de electricidad.

También, en el gráfico 4.13 y 4.14 se puede apreciar que una de las categorías de daño que presenta valores más altos es el Agotamiento de Combustibles Fósiles, lo cual se debe a los procesos que se encuentran sometidos el cáñamo virgen (sembrado, riego, fertilización, cosecha, entre otros) y el pinchips de eucalipto (secado), ya que traen una carga ambiental importante asociada a estos procesos.

Por otro lado, en las figuras 4.13 y 4.14, también trae asociado impactos sobre la Salud Humana, los cuales son elementos cancerígenos, no cancerígenos y efectos respiratorios, estas categorías son las que menos emisiones traen en la mezcla de cal basada en cáñamo residuo, por lo tanto, contribuye a un posible reemplazo de aislante térmico tradicional incluso posible reemplazo del hempcrete.

#### **4.7 Conclusión**

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en las etapas correspondientes a cada objetivo específico considerados en esta investigación. Se obtuvieron la caracterización física y química del pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo a utilizar en las mezclas. En cuanto a distribución granulométrica se evidencia similitudes en ambos residuos utilizados, con el cáñamo utilizado en el hempcrete entregada por Bumanis et.al, (2022) y Viel et.al (2020). El pinchips de eucalipto se asemeja con los tamaños superiores y el residuo de cáñamo la parte inferior de ambas curvas.

Los resultados de la parte técnica permiten correlacionar las densidades de las mezclas a hempcrete con fines de aislación térmica de muro, según lo establecido Magwood (2016), además existe una relación directa a mayor cantidad de pinchips en las mezclas mayor va a ser la densidad, es por esto, que se decidió realizar combinaciones entre pinchips y residuo de cáñamo, para

lograr densidades óptimas propias del hempcrete, a su vez relacionar con conductividades térmicas. En cuanto a propiedades mecánicas como resistencias a la compresión de las mezclas no existe una variación significativa entre las mezclas.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La caracterización de los residuos, pinchips de eucalipto y el residuo de cáñamo, reveló densidades aparentes de  $170 \text{ kg/m}^3$  y  $90 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. La densidad del residuo de cáñamo es casi la mitad de la del pinchips de eucalipto, debido a las diferencias en su origen natural. Mientras que el cáñamo alcanza alturas de maduración aproximadamente de 3 metros, el eucalipto puede llegar hasta los 30 metros. Estas diferencias físicas influyeron en las densidades de las mezclas, resultando en densidades más altas.

En cuanto a la caracterización química de los residuos, no presentan mayores diferencias significativas. Por lo tanto, se puede concluir que las propiedades químicas no interfieren en las características mecánicas de las mezclas, ya que solo las propiedades físicas deben considerarse al utilizar este tipo de material de origen vegetal.

La mezcla basada en cal con 100% residuo de cáñamo es la aplicación que muestra los resultados técnicos y medioambientales más prometedores. Las propiedades mecánicas se evaluaron a los 14 y 28 días, alcanzando una resistencia a la compresión máxima a los 28 días para la mezcla 1:1.5:1.5 fue de  $0,094 \text{ MPa}$  y para la mezcla 1:2:2 fue  $0,098 \text{ MPa}$ . Con respecto a las densidades para la misma mezcla se obtuvo una densidad de  $279 \text{ kg/m}^3$  y para la segunda mezcla se obtuvo una densidad  $350 \text{ kg/m}^3$ . Con respecto al Análisis de Ciclo de Vida, se dividen en siete indicadores ambientales y tres indicadores sobre la salud humana. Sobre los tres indicadores se observó una diferencia significativa entre las alternativas, el residuo de cáñamo generó emisiones en efectos respiratorios solo un 10%, en los otros dos indicadores cancerígenos y no cancerígenos, se produjeron solo un 20% de emisiones en ambas mezclas. Esto

presenta el beneficio salud humana de la utilización de técnicas de mezclas basadas en cal con cáñamo residuo.

Por otro lado, la mezcla basada en cal con 100% de pinchips de eucalipto es la aplicación técnica y ambientalmente más desfavorable. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas a los 14 y 28 días, es así como la resistencia a la compresión máxima fue a los 28 días para la mezcla 1:1.5:1.5 fue de 0,112 MPa y para la mezcla 1:2:2 fue 0,102 MPa. Con respecto a las densidades para la misma mezcla se obtuvo una densidad de 407 kg/m<sup>3</sup> y para la segunda mezcla se obtuvo una densidad 392 kg/m<sup>3</sup>, esto se debe a la naturaleza propia del pinchips tiene mayor densidad, generando mayor densidad en las mezclas y esto perjudica principalmente a la conductividad térmica ya que ambas propiedades son correlacionadas. En cuanto a la parte ambiental, en la categoría de calentamiento global genera 320 kg CO<sub>2</sub> eq, esto se debe a que el subproducto llega en estado húmedo y para incorporarlo a las mezclas este debe ser incorporado en estado seco a las mezclas.

En el caso de las mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo técnicamente los resultados son concordantes en cuanto a densidad y resistencia a la compresión, pero ambientalmente es necesario realizar cambios en el secado del pinchips de eucalipto ya que este es el punto crítico en ambas mezclas generando emisiones cercanas al 40% en cada una de las categorías analizadas.

Desde un enfoque sostenible, pueden mejorar el resto de las mezclas si el aglutinante es reemplazado por residuos que contengan puzolana como lo es el polvo de vidrio, polvo de cerámica, ceniza volante de termoeléctrica y ceniza de biomasa, son factores para considerar ya que estos permitirían disminuir la utilización de la cal como material aglomerante, el cual es el que genera

emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, y reemplazando este principal elemento este factor de importancia disminuiría.

Los beneficios propuestos por las mezclas basadas en cal con pinchips de eucalipto y/o residuo de cáñamo son válidos con los materiales utilizados en esta investigación.

El proceso de evaluación medioambiental de una aplicación es relevante a la hora de analizar el uso de subproductos y/o residuos en el sector de la construcción. En efecto, considerando que el estudio de nuevos materiales requiere ensayos de laboratorio y/o a escala real, que generalmente implican altos costos de investigación, es fundamental determinar la viabilidad ambiental de la aplicación, antes de realizar inversiones significativas. En esta investigación, presenta una alternativa económica con bajos costos de materiales, correlacionando la densidad con la conductividad térmica y además de requerimientos computacionales para el análisis de las diferentes

**Como futuras líneas de investigación se pueden mencionar los siguientes temas:**

- Evaluar conductividad térmica de las mezclas elaboradas en este estudio para validar la correlación con las densidades obtenidas.
- Reducir la cantidad de aglomerante mediante el uso de residuos industriales y domiciliarios, como vidrio reciclado de botellas, cenizas volantes de termoeléctricas y biomasa, en la producción de aislantes térmicos basados en cal.
- Construir un prototipo de muro utilizando las mezclas desarrolladas en esta investigación para evaluar el método de compactación propuesto.
- Construir un prototipo de muro utilizando las mezclas desarrolladas en esta investigación para evaluar el comportamiento durante el proceso de secado
- Realizar pruebas para verificar el comportamiento al fuego de cada una de las mezclas propuestas.

## REFERENCIAS

- Amaro, C. (2021). *Cultivo cáñamo industrial temporada agrícola 2020-2021 Antecedentes Generales*.
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Balčiūnas, G., Žvironaitė, J., Vėjelis, S., Jagniatinskis, A., & Gaidučis, S. (2016). Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and sapropel binder. *Industrial Crops and Products*, 91, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.034>
- Brzyski, P., Gładecki, M., Rumińska, M., Pietrak, K., Kubiś, M., & Łapka, P. (2020). Influence of hemp shives size on hygro-thermal and mechanical properties of a hemp-lime composite. *Materials*, 13(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13235383>
- Bunster, V., & Bustamante, W. (2020). *Inventario de materiales de construcción en Chile: Metodología y resultados*. 7.
- Cerezo, V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. <https://www.researchgate.net/publication/37813495>

- Chabannes, M., Garcia-Diaz, E., Clerc, L., & Bénézet, J. C. (2015). Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. *Construction and Building Materials*, 94, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032>
- Cifuentes, L; Cabrera, C; Lapuente, P. (2017). *Analisis comparativo del ciclo de vida (ACV) de envases familiares retornables y desechables de coca-cola*. 84.
- Collet, F., & Pretot, S. (2014). *THERMAL CONDUCTIVITY OF HEMP CONCRETES: VARIATION WITH FORMULATION, DENSITY AND WATER CONTENT*.
- De Bruijn P, J. K.-H. S. K. N. C. (2008). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *El Sevier*.
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655–3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>
- Di Capua, S. E., Paolotti, L., Moretti, E., Rocchi, L., & Boggia, A. (2021). Evaluation of the Environmental Sustainability of Hemp as a Building Material, through Life Cycle Assessment. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 1215–1228. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0092>
- Fayos Ortega, H. (2013). *Comparativa ambiental y económica del ciclo de vida de cubiertas planas*.

- García, E. (2022). *Análisis de beneficios técnicos y ambientales de aplicaciones de hormigón con material reciclado de nfu.*
- Güereca, L. P., Jato-espino, D., & Lizasoain-arteaga, E. (2019). Handbook of Environmental Materials Management. In *Handbook of Environmental Materials Management*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7>
- Hempel, J., & Läderach, T. (2021). *The HempLime Handbook: Welcome to the world of natural building* (L. L. T. Minnie, Ed.).
- Hirst, E. A. J., Walker, P., Paine, K. A., & Yates, T. (2012). Characteristics of low-density hemp-lime building materials. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 165(1), 15–23. <https://doi.org/10.1680/coma.1000021>
- Ip, K., & Miller, A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>
- Jere, K. (2018). *Thermal Properties of Hempcrete, a Case Study*. May, 10–21. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/149515/Komsi\\_Jere.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/149515/Komsi_Jere.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kemppainen, J. (2016). *Modeling and validation of the milk of lime production process.*

- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020a). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(June), 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020b). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(June), 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Liu, L. F., Li, H. Q., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C. Y., Liu, Q. Bin, & Li, N. P. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(July 2016), 912–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
- Lupu, M. L., Isopescu, D. N., Baci, I.-R., Maxineasa, S. G., Pruna, L., & Gheorghiu, R. (2022). Hempcrete - modern solutions for green buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1242(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1242/1/012021>
- Magwood, C. (2016). *The essential guide to hempcrete-a strong, versatile, environmentally-friendly, energy-efficient natural insulating material.*
- Morales, R. (2006). *Medios de cultivo liquidos para el desarrollo de inoculados de hongos de pudricion blanca aplicables en biopulpaje kraft.*

- Poblete Hernández, P., Caselli, J. G., Álvarez González, V., Carlos, J., Munita, B., Kahler González, C., Pardo Velásquez, E., Soto Aguirre, D., & Rocha, D. B. (2023). *ANUARIO FORESTAL CHILEAN STATISTICAL YEARBOOK OF FORESTRY 2023*. [www.infor.cl](http://www.infor.cl)
- Pochettino, A. A. (2019). El Hombre, Los Materiales Y El Medioambiente. *Ciencia e Investigación*, 69(4), 67–88.
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Somé, S. C., Ben Fraj, A., Pavoine, A., & Hajj Chehade, M. (2018). Modeling and experimental characterization of effective transverse thermal properties of hemp insulation concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.210>
- Soto, D. A., Pardo, E. V., & Poblete, P. H. (2021). *LA INDUSTRIA DE ASTILLAS 2021*. [www.infor.cl](http://www.infor.cl)
- Stanwix, William., & Sparrow, Alex. (2014). *The hempcrete book : designing and building with hemp-lime*.
- Viel, M., Collet, F., & Lanos, C. (2020a). Effect of compaction on multi-physical properties of hemp-black liquor composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020(2). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.079>

- Viel, M., Collet, F., & Lanos, C. (2020b). Effect of compaction on multi-physical properties of hemp-black liquor composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020(2). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.079>
- Vogtländer, J. (2012). LCA, a practical guide for students, designers and business managers. In *Delft Academic Press* (Issue May).
- Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>

## ANEXO 4.1: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS

### ANEXO 4.1.1: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA



LABORATORIO AGRICOLA  
ANÁLISIS DE SUELO - FOLIAR - AGUA

#### INFORME DE RESULTADOS - Nº Orden: 185.974 FERTILIZANTES ORGANICOS

Productor : Cecilia Fuentealba  
Predio : Unidad De Desarrollo Tecnológico

Empresa :  
Remite : Cecilia Fuentealba

Provincia : Concepcion  
Comuna : Coronel  
Localidad : Coronel

Fecha muestreo : 01-03-2023 F.Ingreso : 30-03-2023  
Fecha análisis : 18-04-2023 F.Informe : 27-04-2023

Tipo muestra : Organico

Pag. 1/1

Identificación muestra :	Madera De Cañamo	Pinchips	NCh2880: 2015 Compost - Requisitos de calidad y clasificación	
			Nivel Aceptación*	Método
Nº de Laboratorio :	31521	31522		
<b>Análisis Físicos</b>				
<b>Tamaño de partículas</b>				
> 16,0 mm %	0	0	0	TMECC 02.02-C*
8,0 mm - 16,0 mm %	28	0	-	TMECC 02.02-C*
4,0 mm - 8,0 mm %	57	31	-	TMECC 02.02-C*
2,0 mm - 4,0 mm %	14	42	-	TMECC 02.02-C*
< 2,0 mm %	1	27	-	TMECC 02.02-C*
<b>Materiales no compostables</b>				
Piedras,terrones de barro > 4mm %	0,0	0,0	< 5	AS 4454
Plásticos flexibles, películas > 4mm %	0,00	0,00	< 0,05	AS 4454
Vidrio,metal,caucho,plástico rígido > 2mm %	0,0	0,0	< 0,5	AS 4454
Densidad aparente kgm3	90	170	< 700	TMECC 03.01-ABC
Espacio poroso %	83	84	-	TMECC 03.01-ABC
Espacio aire libre %	58	54	-	TMECC 03.01-ABC
<b>Capacidad retención agua</b>				
Base volumen %	25	30	-	TMECC 03.01-ABC
Base masa %	230	190	-	TMECC 03.01-ABC
Humedad %	7	25	30 - 45	TMECC 03.09
Materia Seca %	93	75	-	TMECC 03.09

**Observaciones:**

\* Norma NCh2880: 2015 Compost-Requisitos de calidad y clasificación. Nivel de aceptación para producto compostado, los elementos que fi sin nivel no se encuentran regulados en la norma.

**Materiales no compostables:**

- Muestras no presentan materiales no compostables.



R. E. ...  
Socio-Propietario Gerente  
del Laboratorio

**Notas:**

- Análisis realizado en base a Materia Seca.
- Metodologías: TMECC, Test Methods for Examination of Composting and Compost, 2001. AS 4454 Australian Standard Composts, soil conditioners and mulches.
- Agrolab se encuentra acreditado por la Comisión de Normalización y Acreditación (CNA) de la Soc. Chilena de la Ciencia del Suelo para realizar análisis de compost, suelo y foliar, además está acreditado por el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) para realizar los análisis requeridos por el Ministerio de Agricultura para los programas de recuperación de suelos degradados.
- Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas las cuales fueron proporcionadas por el cliente

V. M. 10 José Domingo Cañas # 2914 - Santiago - Teléfono: 2 2225 8087 - e-mail: laboratorio@agrolab.cl

## ANEXO 4.1.2: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA



LABORATORIO AGRÍCOLA  
ANÁLISIS DE SUELO - FOLIAR - AGUA

INFORME DE RESULTADOS - Nº Orden: 185.974  
FERTILIZANTES ORGÁNICOS

Productor : Cecilia Fuentealba  
Predio : Unidad De Desarrollo Tecnológico

Empresa :  
Remite : Cecilia Fuentealba

Provincia : Concepcion  
Comuna : Coronel  
Localidad : Coronel

Fecha muestreo : 01-03-2023 F.Ingreso : 30-03-2023  
Fecha análisis : 30-03-2023 F.Informe : 24-04-2023

Tipo muestra : **Organico**

Pag. 1/1

Identificación muestra :			Madera De Cañamo	Pinchips	NCh 2880.Of2015		
					Compost-Clasificación y requisitos		
Nº de Laboratorio :			31521	31522	*Nivel Aceptación		Método
					Clase A	Clase B	
<b>Análisis Químicos</b>							
pH	(suspensión 1:10)	1:10	6,4	5,9	5,0 - 8,5		TMECC 04.11
C.Eléctrica	(suspensión 1:5)	dS/m	0,76	0,72	< 3 *	< 6 *	TMECC 04.10
Materia orgánica		%	99,0	100	> 20		TMECC 05.07-A
Carbono orgánico		%	55,0	55,6	> 11		TMECC 05.07-A
Nitrógeno total	(N)	%	0,22	0,36	> 0,5		TMECC 04.03-D
Relacion C/N			250	154	< 30		TMECC 05.07-A
Fósforo total	(P2O5)	%	0,05	0,07			TMECC 04.03-A
Potasio total	(K2O)	%	0,07	0,08			TMECC 04.04-A
Humedad		%	7	25	30 - 45		TMECC 03.09
Materia seca		%	83	75	70 - 55		

\* Producto Compostado



**Notas:**

- Análisis expresado en base a Materia Seca.
- C.Eléctrica : \* Dependerá de la tolerancia a la Salinidad de los diferentes cultivos.
- Metodologías: TMECC Test Methods for the Examination of Composting and Compost.2001
- Agrolab se encuentra acreditado por la Comisión de Normalización y Acreditación (CNA) de la Soc.Chilena de la Ciencia del Suelo para realizar análisis de compost, suelo y foliar, además está acreditado por el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) para realizar los análisis requeridos por el Ministerio de Agricultura para los
- Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas las cuales fueron proporcionadas por el cliente

José Domingo Cañas # 2914 - Santiago - Teléfono: (02) 225 80 87 - e-mail: laboratorio@agrolab.cl

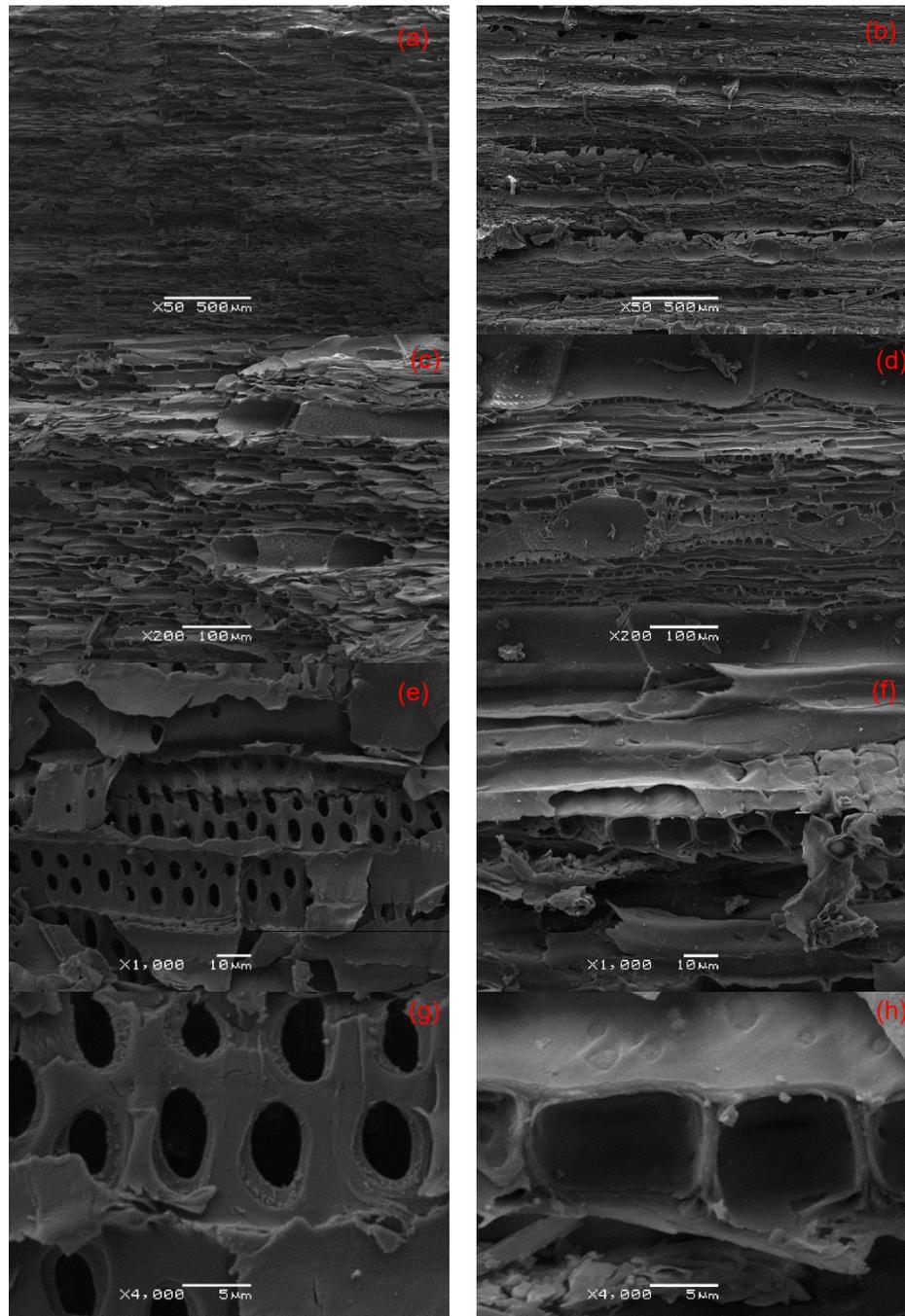
**ANEXO 4.1.3: RESULTADOS DE REGISTRO FOTOGRÁFICO MICROSCÓPICO SEM**

Figura anexo 4.1.3: registro fotográfico microscopio de barrido SEM en diferentes escalas. (a-c-e-g) residuo cáñamo; (b-d-f-h) pinchips de eucalipto.

**ANEXO 4.2: REGISTRO FOTOGRÁFICO TRABAJABILIDAD**

Figura anexo 4.2: registro fotográfico de evaluación de trabajabilidad. (a) muestra seca; (b) 50% de agua; (c) 75% de agua; (d) 100% de agua; (e) 125% de agua extra; (f) 150% de agua extra.

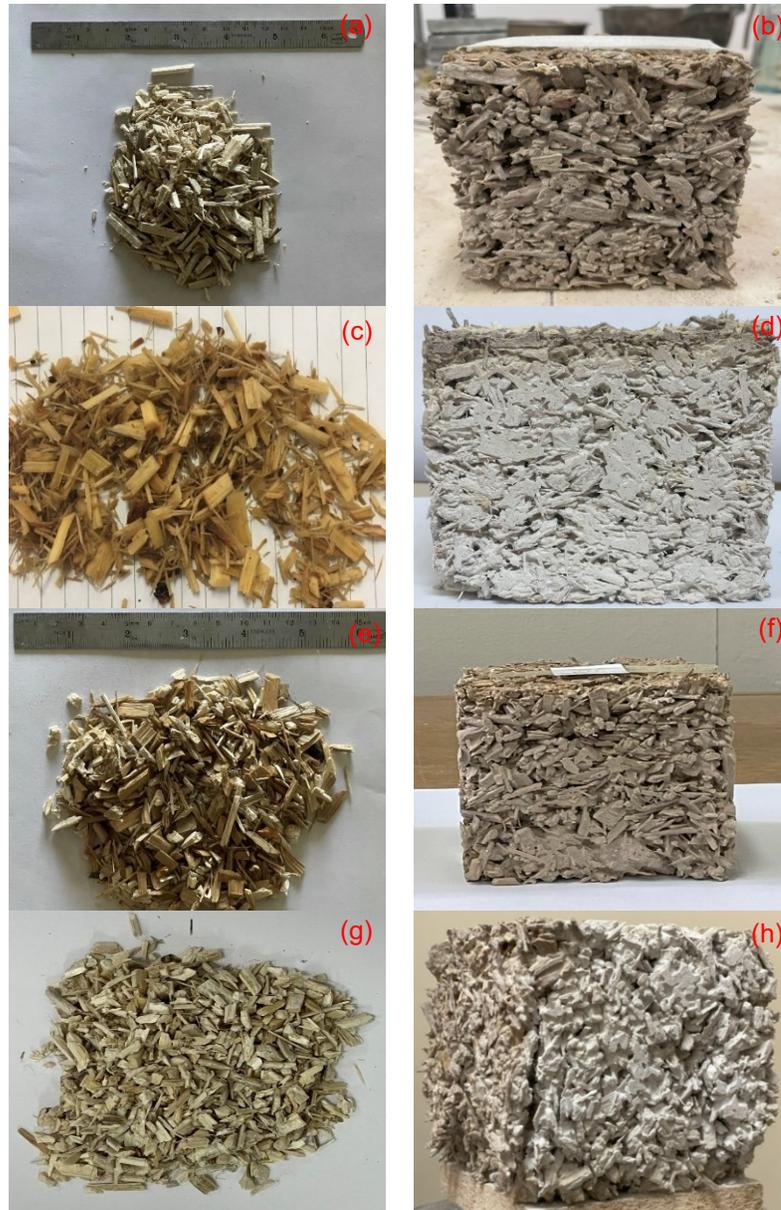
**ANEXO 4.3: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS PROBETAS**

Figura anexo 4.3: registro fotográfico probetas. (a) muestra seca cáñamo virgen; (b) probeta cáñamo virgen; (c) muestra pinchips eucalipto húmedo; (d) probeta pinchips de eucalipto; (e) mezcla pinchips y residuo de cáñamo; (f) probeta pinchips de eucalipto y residuo de cáñamo; (g) muestra residuo cáñamo; (h) probeta residuo cáñamo.

## ANEXO 4.4: RESULTADOS OPEN LCA

### a) Mezcla 1:1,5:1,5 y gráficos de resultados

Impact category	Reference unit	CV*	PE**	RC***	RC 50% - PE 50%	RC 40% - PE 60%
Acidification	kg SO2 eq	0,720165	1,00860255	0,418925	0,71608065	0,775511651
Carcinogenics	CTUh	6,87356E-06	8,07293E-06	1,96601E-06	5,04347E-06	5,65896E-06
Ecotoxicity	CTUe	1128,013	1830,55053	304,7837	1073,66113	1227,436603
Eutrophication	kg N eq	0,332539	0,54609045	0,12615247	0,33777119	0,380094934
Fossil fuel depletion	MJ surplus	254,7880	252,771086	188,7876	221,030705	227,4793256
Global warming	kg CO2 eq	302,2867	337,410780	257,2019	297,621482	305,7053821
Non carcinogenics	CTUh	5,81342E-05	3,38066E-05	1,16133E-05	2,27971E-05	2,50339E-05
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,72885E-05	2,61124E-05	2,11111E-05	2,36314E-05	2,41355E-05
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,135820	0,95493439	0,080225	0,52101643	0,609174542
Smog	kg O3 eq	11,06970	14,9404991	6,212709	10,6108914	11,4905278

\*CV: Cáñamo Virgen

\*\*PE: Pinchips eucalipto

\*\*\*RC: Residuo Cáñamo

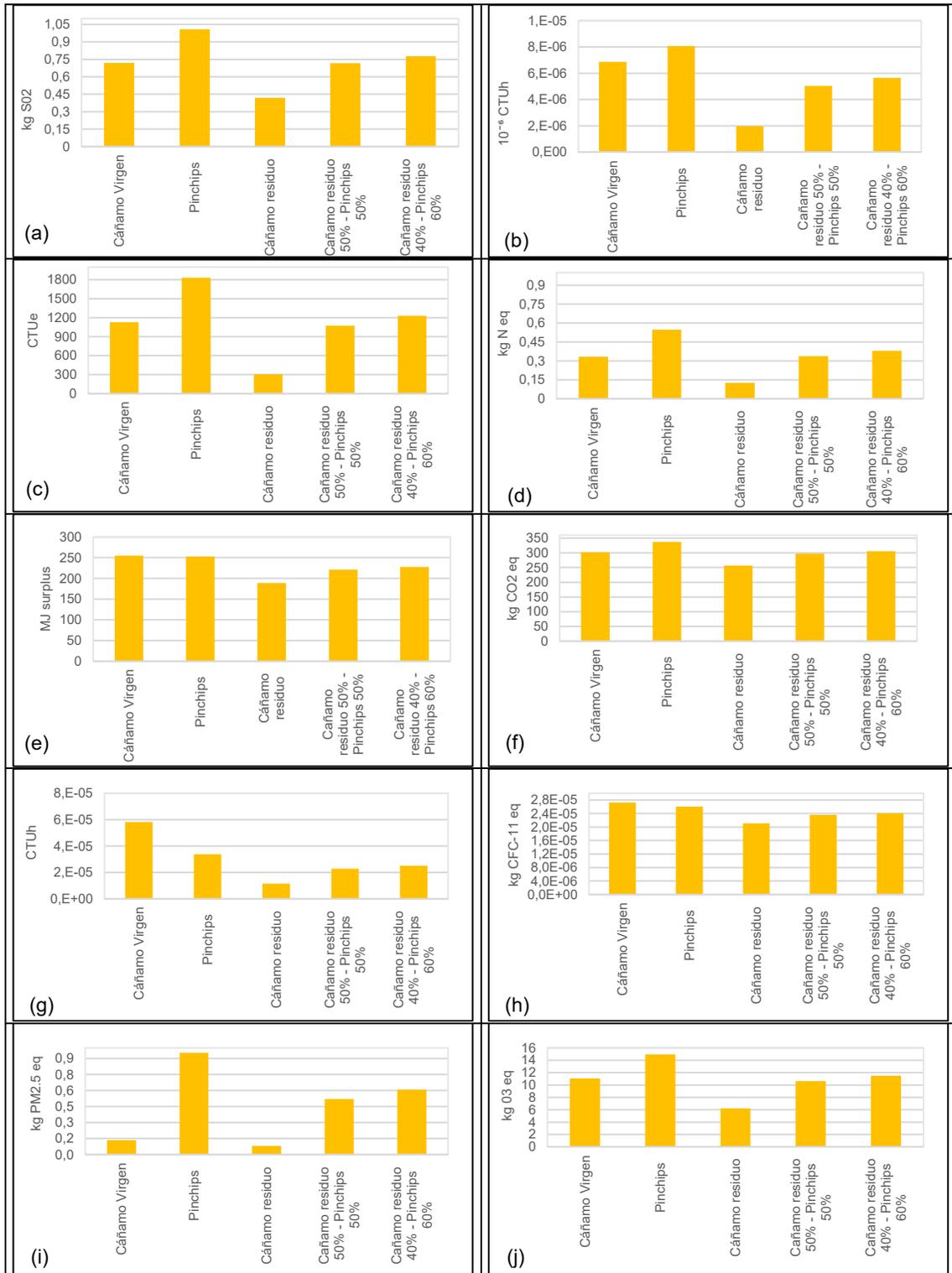


Figura Anexo 4.4.1: resultados por categoría de impacto de la mezcla 1:2:2 evaluada en las diferentes opciones propuesta; (a) Acidificación, (b) Elementos Cancerígenos, (c) Ecotoxicidad, (d) Eutroficación, (e) Agotamiento combustibles fósiles, (f) Calentamiento global, (g) Elementos No Cancerígenos, (h) Agotamiento Capa de Ozono, (i) Efectos respiratorios, (j) Esmog.

## b) Mezcla 1:2:2 y gráficos de resultados

Impact category	Reference unit	CV	PE	RC	RC 50% - PE 50%	RC 40% - PE 60%
Acidification	kg SO2 eq	0,685822881	0,916572434	0,445757535	0,656649653	0,704194452
Carcinogenics	CTUh	6,00217E-06	6,96167E-06	2,08573E-06	4,42797E-06	4,92037E-06
Ecotoxicity	CTUe	978,4520344	1540,481363	322,2655413	919,8856594	1042,906037
Eutrophication	kg N eq	0,298231701	0,469072262	0,133781764	0,295447446	0,329306441
Fossil fuel depletion	MJ surplus	253,9542972	252,3407107	201,2544703	214,5820859	219,7409818
Global warming	kg CO2 eq	310,1413938	338,2406324	274,1996341	289,5375823	296,0047022
Non carcinogenics	CTUh	4,95281E-05	3,0066E-05	1,23463E-05	2,05604E-05	2,23498E-05
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,74433E-05	2,65024E-05	2,25092E-05	2,31273E-05	2,35306E-05
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	0,127049291	0,782340056	0,083947755	0,43285832	0,503384808
Smog	kg O3 eq	10,48254382	13,5791777	6,610660828	9,731255011	10,43496413

\*CV: Cáñamo Virgen

\*\*PE: Pinchips eucalipto

\*\*\*RC: Residuo Cáñamo

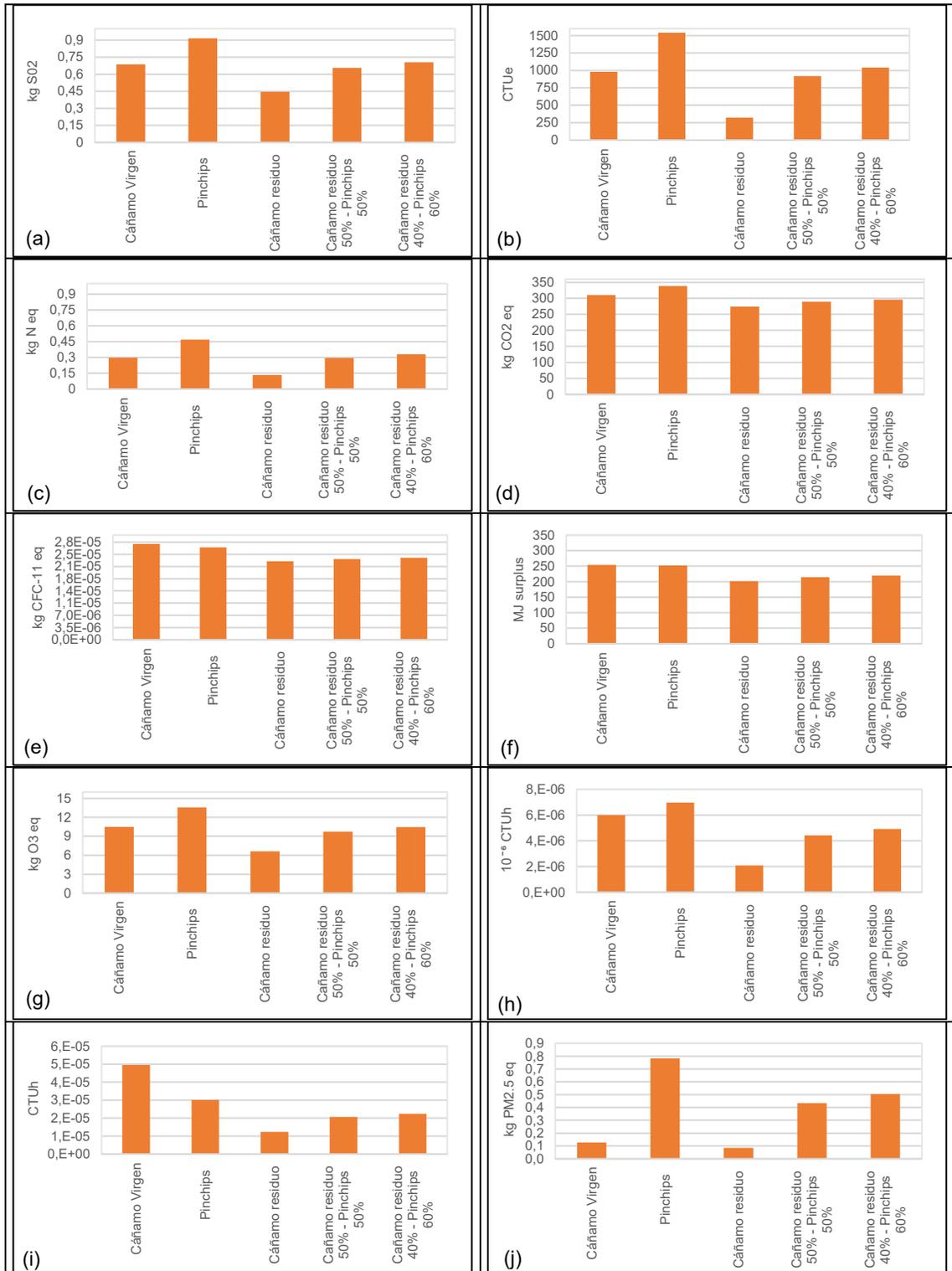


Figura Anexo 4.4.2: resultados por categoría de impacto de la mezcla 1:2:2 evaluada en las diferentes opciones propuesta; (a) Acidificación, (b) Ecotoxicidad, (c) Eutroficación, (d) Calentamiento global, (e) Agotamiento Capa de Ozono, (f) Agotamiento combustibles fósiles, (g) Esmog, (h) Elementos Cancerígenos, (i) Elementos No Cancerígenos, (j) Efectos respiratorios.