



Escuela Universitaria
Centro de Diseño



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DEL CULTIVO DE CÁÑAMO MEDICINAL

Autores Víctor Porras - Silvina Percivale
Tutora Arq. Rosita de Lisi

TESIS DE GRADO EN DISEÑO INDUSTRIAL
PRODUCTO
ESCUELA UNIVERSITARIA CENTRO DE DISEÑO

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022



APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DEL CULTIVO DE CÁÑAMO MEDICINAL

Autores Víctor Porras - Silvina Percivale
Tutora Arq. Rosita de Lisi

TESIS DE GRADO EN DISEÑO INDUSTRIAL
PRODUCTO
ESCUELA UNIVERSITARIA CENTRO DE DISEÑO

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022

Agradecimientos

Este trabajo inició con la Pandemia, el 13 de marzo de 2020 y fue entregado para su corrección el 14 de marzo de 2022.

Dos años de gran esfuerzo que fueron posibles gracias a las personas que apoyaron con su colaboración.

Gracias a los Productores, que nos permitieron realizar visitas a sus plantaciones e instalaciones bajo las restricciones del momento.

Gracias a la Doctora Mary Lopretti y al Ingeniero Pablo Raimonda, por ceder su tiempo y conocimiento y por encontrar los momentos para que fuera posible continuar con este trabajo.

Gracias por la colaboración a la Química Farmacéutica Gabriela Lluberas y al Ingeniero Luis Toro por la paciencia y los cientos de explicaciones.

Gracias a la Doctora Marcela Ibáñez por el tiempo y la disposición para trabajar a tanta distancia en momentos tan complejos.

A nuestra tutora por su guía.

Índice

Índice	3
Índice de Tablas	4
Índice de Imágenes	4
Índice de Esquemas	5
Índice de Gráficos.....	5
Glosario	7
Introducción	9
Objetivos.....	10
Metodología.....	10
CAPÍTULO 1. Marco teórico.....	12
Cannabis Sativa.....	12
Cáñamo Industrial y Marihuana	14
Biomasa Lignocelulósica	16
El cannabis en Uruguay y el mundo.....	20
Antecedentes en el uso de residuos vegetales.....	25
Manejo del cultivo en campo.....	27
El residuo en Uruguay	35
Caracterización química del residuo en Uruguay	37
CAPÍTULO 2. Experimentación.....	43
Introducción	43
Experiencia 1	45
Experiencia 2	47
Evaluación de muestras	50
Resultado de los ensayos	53
Conclusiones de la experimentación.....	54
CAPÍTULO 3. Alternativa de valorización: Biorrefinería	55
Implementación en etapas	63
CONCLUSIONES.....	65
Sugerencias.....	66
Reflexiones	68
Bibliografía.....	69
ANEXOS.....	72
Anexo 1: Caracterización química del residuo en Uruguay	72
Anexo 2: Determinación de tiempos de tamizado.....	74
Anexo 3: Experiencia 1.....	76
Anexo 4: Experiencia 2.....	90

Índice de Tablas

Tabla 1: Cantidad de empresas vinculadas al Cannabis y sus rubros.....	22
Tabla 2: Tenor de holocelulosa, celulosa y lignina en las muestras	38
Tabla 3: Diámetro de las fibras	39
Tabla 4: Composición química de fibra de cáñamo industrial en bibliografía	39
Tabla 5: Comparación entre datos de estudio y bibliografía.....	40
Tabla 6: Denominaciones y variables en las muestras de la Experiencia 1.....	45
Tabla 7: Denominaciones y variables en las muestras de la Experiencia 2.....	47
Tabla 8: Ensayos realizados en cada experiencia	50
Tabla 9: Resultados de los ensayos de la Experiencia 1	53
Tabla 10: Resultados de los ensayos de la Experiencia 2	53
Tabla 11: Aspecto del material obtenido	54
Tabla 12: Caracterización química comparada del bagazo y el cáñamo medicinal	57
Tabla 13: Compuestos de la hemicelulosa del bagazo	57
Tabla 14: Contenido de humedad y extractivos en las muestras de cáñamo	73
Tabla 15: Contenido de cenizas y volátiles en las muestras de cáñamo	73
Tabla 16: Representatividad de cada granulometría en la molienda	74
Tabla 17: Reducción de las membranas luego del secado en horno	78
Tabla 18: Absorción de humedad: Experiencia 1	79
Tabla 19: Temperaturas de degradación de componentes del cáñamo	84
Tabla 20: Eventos térmicos y picos estudiados del cáñamo	85
Tabla 21: Temperaturas de degradación de componentes de la matriz	87
Tabla 22: Eventos térmicos y picos estudiados de la matriz	87
Tabla 23: Absorción de humedad: Experiencia 2.....	94

Índice de Imágenes

Imagen 1: Cannabis Sativa L.	12
Imagen 2: Sección transversal de un tallo de cáñamo	13
Imagen 3: Cantidad de plantaciones registradas por departamento.....	21
Imagen 4: Países donde el Cannabis recreativo es legal.....	23
Imagen 5: Países donde el Cáñamo medicinal es legal	23
Imagen 6: Utilización de tablas de material biocompuesto	25
Imagen 7: Utilización de paneles de material biocompuesto	26
Imagen 8: Productos ecológicos de la empresa Betik.....	26
Imagen 9: Zona de cultivo de plantaciones relevadas.....	27
Imagen 10: Plántulas de Cáñamo Medicinal	28
Imagen 11: Plantación de Cannabis Medicinal en Canelones.....	29
Imagen 12: Procesos de manicurado fino	32
Imagen 13: Inflorescencias listas para el secado en cámara	33
Imagen 14: Residuo de cáñamo acumulado en el campo	35
Imagen 15: Secado del residuo de Cáñamo	36
Imagen 16: Microscopía óptica de fibra del residuo de cáñamo.....	38
Imagen 17: Membranas obtenidas en la Experiencia 1.....	46
Imagen 18: Sección de la muestra 300.....	46

Imagen 19: Resultados obtenidos.....	48
Imagen 20: Medición del PH en muestra Blanca.....	49
Imagen 21: Microscopía óptica: Cara superior.....	50
Imagen 22: Absorción de humedad.....	51
Imagen 23: Probeta en ensayo de Tensión.....	52
Imagen 24: Estructuras en tamizados extensos.....	75
Imagen 25: Fotografías de cáñamo molido en diferentes granulometrías.....	76
Imagen 26: Aspecto de la muestra después de la sumersión.....	81
Imagen 27: Microscopía óptica de fibra del residuo de cáñamo.....	82
Imagen 28: Equipo Netzsch STA 449 F5 Jupiter.....	83
Imagen 29: Moldes usados en la Experiencia 2.....	90
Imagen 30: Enriado del material.....	91
Imagen 31: Análisis de Tensión: Corte de probeta con sacabocado.....	98

Índice de Esquemas

Esquema 1: Diferenciación fenotípica y morfológica.....	15
Esquema 2: Productos derivados de una biorrefinería lignocelulósica.....	18
Esquema 3: Cultivo de cáñamo con fines medicinales.....	30
Esquema 4: Procesamiento del cáñamo medicinal.....	31
Esquema 5: Diagrama de cajas comparativo: % Celulosa.....	40
Esquema 6: Diagrama de cajas comparativo: % Hemicelulosa.....	41
Esquema 7: Diagrama de cajas comparativo: % Lignina.....	41
Esquema 8: Origen y grado de biodegradabilidad de algunos polímeros.....	43
Esquema 9: Proceso realizado en la Experiencia 1.....	45
Esquema 10: Proceso realizado en la Experiencia 2.....	48
Esquema 11: Diagrama simplificado de los procesos involucrados.....	56
Esquema 12: Propuesta básica de aprovechamiento del residuo.....	58
Esquema 13: Reúso de la fracción líquida en el pretratamiento de la biomasa.....	59
Esquema 14: Recirculación de líquidos para el residuo de cáñamo.....	60
Esquema 15: Implementación del proceso en etapas.....	63
Esquema 16: Propuesta de proceso para experimentación.....	66
Esquema 17: Distribución de las granulometrías en el material de carga.....	77
Esquema 18: Agrupación de granulometrías en el material de carga.....	92

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Granulometrías en cada tamizada.....	74
Gráfico 2: Absorción de humedad: Variación de masa (Exp. 1).....	80
Gráfico 3: Análisis DSC del material de carga.....	84
Gráfico 4: TG/DSC del cáñamo.....	85
Gráfico 5: Análisis DSC del material de carga.....	86
Gráfico 6: TG/DSC de la matriz.....	87
Gráfico 7: DSC de las muestras.....	88
Gráfico 8: TGA de las muestras.....	88
Gráfico 9: TGA/DSC.....	89
Gráfico 10: Absorción de humedad: Variación de masa (Exp. 2).....	95

Gráfico 11: Absorción de humedad: Comparativo muestra 45	96
Gráfico 12: Absorción de humedad: Comparativo muestra 75	96
Gráfico 13: Absorción de humedad: Comparativo muestra 300	97

Glosario

Adsorción

Dicho de un cuerpo, acción y efecto de atraer y retener sobre su superficie moléculas o iones de otro cuerpo.

Biodegradable

Un material se considera biodegradable cuando éste se transforma en biomasa y nutrientes, de forma natural y sin intervención del hombre.

Biopolímero

Macromoléculas presentes en los seres vivos, que intervienen en procesos biológicos, por ejemplo, proteínas y ácidos nucleicos.

Cámbium

Estrato celular de las plantas leñosas, responsable del engrosamiento de tallos y raíces.

Carga

La carga, fase de carga o fase dispersa, se define como el conjunto de los materiales que se agregan a una formulación de polímero para reducir el costo del compuesto o para mejorar sus propiedades, aportando rigidez y aumentando la resistencia, entre otras. Estos materiales pueden ser polímeros, metales, fibras de origen vegetal o sintéticas. La cantidad empleada se expresa como una fracción (en volumen o peso) del total del material compuesto.

Celulosa

Polisacárido que forma la pared de las células vegetales.

Compostable

Material que luego de ser desechado se puede convertir a través de la acción del

hombre en compost, es decir, en abono orgánico.

Enriado

Proceso de fermentación microbiológica de los tallos de lino y cáñamo, que permite la extracción y separación de los haces fibrosos corticales de la porción leñosa del tallo, mediante una maceración.

Epidermis

Membrana formada por una sola capa de células que cubre el tallo y las hojas de las plantas del grupo de las criptógamas y de las fanerógamas.

Fibra de líber

Se conoce también por su denominación en inglés, bast fibre y corresponde a la fibra primaria de tejido vegetal que se encuentra en el floema de plantas como el cáñamo y el lino.

Floema

Tejido vivo de las plantas vasculares que transporta sustancias orgánicas e inorgánicas de una parte a otra de estos organismos.

Hemicelulosa

Heteropolisacáridos que forman parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina.

Hidrólisis

Reacción que ocurre entre una molécula de agua y otra macromolécula. En nuestro contexto de química orgánica, el agua reacciona con una molécula orgánica rompiendo un enlace covalente, para formar dos moléculas

orgánicas con grupos funcionales que incluyen los átomos de la molécula de agua. Generalmente se necesita añadir ácidos o bases fuertes para catalizar la hidrólisis.

Holocelulosa

Polisacárido compuesto por hemicelulosa y celulosa.

Lignina

Compuesto orgánico básico de los tejidos leñosos de las plantas.

Lignocelulosa

Materia vegetal seca más abundante en el mundo. Generalmente utilizada en la producción de biocombustibles.

Material biocompuesto

Es un material compuesto cuyo elemento de refuerzo proviene de fibras naturales, principalmente de origen vegetal.

Material laminado híbrido

Son materiales que constan de un núcleo adherido a dos láminas exteriores, cuyo objetivo generalmente es darle estructura y proteger al núcleo, que puede tener propiedades aislantes, ser una estructura alveolada, etc.

Matriz polimérica

La matriz polimérica o simplemente matriz, consiste en una fase de polímero, dentro de la cual se embebe la fase de carga. Su función es estabilizar y repartir las tensiones entre las partículas, aportando además un conjunto de propiedades que dependen de su composición química.

Pectina

Polisacárido complejo presente en las paredes celulares de los vegetales, especialmente en las frutas, que se utiliza como espesante en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

Quitano

También conocido como quitosán, es uno de los polímeros más abundantes de la naturaleza. Su nombre deriva del griego χιτών que significa "coraza" y se obtiene del exoesqueleto de crustáceos e insectos. Es biodegradable y no tóxico. Se usa como espesante y conservante de alimentos, en medicina, como agente hemostático. En química, como aglutinante y en el desarrollo de plásticos.

Refuerzo

Carga que aporta mejoras estructurales a un material compuesto o biocompuesto.

Xilema

Tejido leñoso de las plantas vasculares, que transporta principalmente agua y minerales de una parte a otra de estos organismos.

Xilitol

Es un polialcohol (o azúcar alcohol) obtenido por la reducción del azúcar xilosa y se utiliza como sustituto de la sacarosa en los alimentos aptos para diabéticos.

Xilosa

Monosacárido que forma parte de los ocho azúcares esenciales para la nutrición humana.

Introducción

Durante los últimos años se ha comenzado a desarrollar en Uruguay la producción de cannabis psicoactivo y no psicoactivo¹. Esto genera grandes oportunidades laborales en nuestro país y ventanas hacia la investigación y desarrollo de productos derivados de este cultivo, principalmente de sus inflorescencias. Por otro lado, genera una gran cantidad de biomasa, proveniente del tallo y las ramas de la planta, sin un uso posterior, el cual se vuelve un residuo. Es en este material en el que nos centramos para el desarrollo de este trabajo.

A pesar de ser un material de origen vegetal, la biomasa residual genera grandes problemas en su manejo, tales como gastos energéticos y contaminación por la quema de combustible fósil en su gestión y traslado, o la contaminación por la quema al aire libre.

El cannabis es una planta versátil que ha sido utilizada desde hace cientos de años en varios lugares del mundo y ha sido modificada para potenciar sus características. El cultivo de cáñamo² con fines medicinales es relativamente nuevo, al igual que su método de cultivo.

Observando esta situación y conociendo la intención estatal de apoyar el crecimiento del sector, nos preguntamos: ¿Cuáles son las características del residuo en Uruguay? ¿Cuáles podrían ser sus posibles usos y aplicaciones?

Dada la situación actual de Uruguay, donde se da un marco legal propicio para la producción y desarrollo de productos a partir del cannabis psicoactivo y no psicoactivo regida por la ley 19.172, sumada a la creciente demanda internacional principalmente en el área medicinal, la plantación de este cultivo ha tenido un crecimiento exponencial.

En cuanto a las licencias solicitadas que habilitan a los productores, investigadores y empresas a trabajar con cannabis, se manifestó un pico histórico de autorizaciones en 2019. Se pasó de 19 empresas autorizadas en diciembre 2018, a más de 40 empresas a finales del 2019.

Actualmente los cultivos no psicoactivos ocupan una superficie de 476 ha a cielo abierto y 90.000 m² cubiertos aproximadamente. Esto generaría, según cálculos que hemos realizado en base a plantaciones de cáñamo con fin medicinal, 2.075.000 kg anuales en base húmeda, solo de tallos y ramas primarias. Sin datos para cultivos psicoactivos.

Este residuo tiene una potencial aplicación en el desarrollo de bioplásticos, biocomposites, aglomerados, materiales aislantes y productos químicos. Por lo tanto, creemos importante tratarlo bajo los principios de economía circular, donde los desechos vuelven a incorporarse a la cadena de valor. Lo anteriormente dicho, propicia

¹ Ver Diferenciación fenotípica en página 15.

² Ver Definición de Cáñamo en página 15.

el desarrollo tecnológico y productivo del nuevo sector que comienza a fortalecerse año a año en nuestro país y en el mundo.

Para llegar al posible desarrollo de productos es necesario conocer las características particulares de la materia prima con la que se cuenta y esto supone un aporte teórico sobre las condiciones y la situación actual del cultivo en nuestro país.

Objetivos

Objetivo general

Proponer alternativas para la transformación y valorización del residuo resultante de las plantaciones de cáñamo medicinal, buscando maximizar el aprovechamiento de este.

Objetivos específicos

- Conocer las condiciones actuales del tipo de cultivo y los procesos productivos en Uruguay.
- Caracterizar el residuo agroindustrial en Uruguay.
- Experimentar con el residuo para definir, desde el diseño, posibles procesos de transformación y aplicaciones.

Metodología

El proceso metodológico realizado se dividió en tres etapas bien diferenciadas: la primera de acercamiento al tema, que consistió en una investigación sobre la planta, su cultivo, mercados asociados, productos derivados y características del desecho; una segunda etapa de experimentación y ensayos; para finalizar con una tercera etapa, que consistió en la elaboración de una propuesta de valor.

Fue necesaria la colaboración de diferentes institutos de la Universidad de la República por la complejidad de la temática y la falta de conocimientos específicos sobre áreas tan distintas como agronomía, bioquímica, e ingeniería, volviéndose un verdadero trabajo interdisciplinario.

Desde Facultad de Agronomía contamos con el apoyo del Instituto Superior de Estudios Forestales, CENUR Noreste, para la realización de la caracterización química del material, dirigida por la Dra. Marcela Ibáñez. La molienda fue realizada por el Ing. Agrónomo Nicola Di Muro, del Departamento de Suelos y Aguas de la misma facultad. La propuesta de formulación de la membrana para el desarrollo del material fue una colaboración de la directora del Centro de Investigaciones Nucleares, de Facultad de Ciencias, Dra. Mary Lopretti y su ayudante QF. Gabriela Lluberas. Los ensayos TGA y DSC fueron realizados por el Prof. Adjunto Mauricio Rodríguez, del PDU del Centro Universitario Regional del Este (CURE) - sede Rocha y sus informes fueron realizados

por el Ing. Luis Toro. Los ensayos de absorción de humedad, microscopía óptica y tensión fueron realizados en Facultad de Ingeniería, orientados por el Ing. Pablo Raimonda, director del Instituto de Ensayo de Materiales y acompañados por su ayudante, Ing. Luis Toro.

Etapa 1

Se realizó una investigación de antecedentes sobre el cultivo de cannabis, desde un punto de vista económico, político, social e industrial y sus aplicaciones a nivel internacional e impacto a nivel regional.

Se realizó una investigación de campo con visitas a plantaciones en la zona de Canelones, para comprender el manejo del cultivo a nivel local y sus características.

Se cuantificó el residuo por no contar con estos datos a nivel nacional.

Para finalizar esta etapa, se realizó una caracterización química de la materia residual, la cual fue comparada con datos bibliográficos a nivel mundial, por no estar definidas en esta zona.

Etapa 2

En esta etapa se realizó el acercamiento al desarrollo de un material biocompuesto³, mediante experimentaciones basadas en una matriz de Quitosano⁴ y Alcohol polivinílico (PVA), para luego someterlo a análisis y ensayos cuantitativos.

Etapa 3

Consideramos esta etapa como una síntesis de lo estudiado, experimentado y aprendido en las etapas 1 y 2. Se tomó como punto de partida un esquema de biorrefinería para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos⁵, propuesto por Nicolás Clauser de la Universidad Nacional de Misiones, Argentina, en su tesis de doctorado. El mismo se adaptó a nuestra materia prima, proponiendo la implementación de un proceso productivo en etapas, considerando la recirculación y valorización de los fluidos residuales generados.

³ Ver definición en Glosario.

⁴ Polímero natural de múltiples aplicaciones. Ver Glosario.

⁵ Ver definición de Lignocelulosa en Glosario.

1. Marco teórico

Cannabis Sativa

Taxonomía

Cannabis Sativa es una planta herbácea anual, de la familia de las Cannabaceae. Tanto el tipo de ramificación como la altura de la planta, dependen de factores ambientales y hereditarios, así como del método de cultivo. Crece durante 4 o 5 meses, alcanzando alturas desde 1 a 5 metros y diámetros de entre 10 y 60 milímetros, siendo uno de los cultivos de crecimiento más rápido.



Imagen 1: Cannabis Sativa L.

A: Flor masculina B: Flor femenina

Extraído de: <https://www.tecnicoagricola.es/descripcion-de-la-planta-cannabis-sativa>
(2012, febrero).

El tallo se compone de una capa externa relativamente fina (epidermis⁶ y floema⁷) y un núcleo leñoso (xilema⁸) que rodea la médula. La capa externa constituye, en promedio, el 30 a 35 % del peso seco del tallo con una proporción de corteza que va desde el 12 al 48 % (Van der Werf, 1994). En esta capa encontramos las fibras primarias o fibras de liber, utilizadas para desarrollo de textiles en cultivos con ese fin. El porcentaje de fibra que compone dicha capa ronda el 30 %. Las fibras primarias son muy variables en largo (10 a 100 mm), con un promedio de 20 a 40 mm y de paredes gruesas y rígidas.

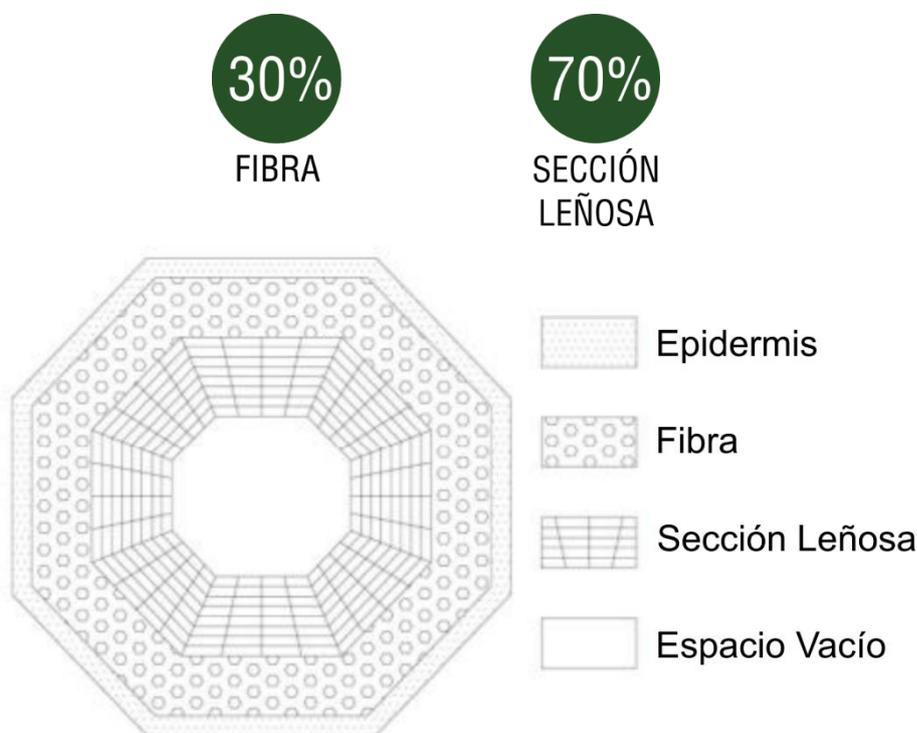


Imagen 2: Sección transversal de un tallo de cáñamo
Fuente Stevulova, N. et al, (2014).

El núcleo leñoso o sección leñosa, constituye el otro 65 a 70 % del peso del tallo, y consiste en fibras cortas (cañamiza), que tienen un largo relativamente constante (0,5 a 0,55 mm), siendo mucho más cortas que las fibras aún jóvenes de la mayoría de las especies de madera dura y blanda.

Las fibras del floema del tallo del cáñamo con fines textiles contienen considerablemente más celulosa⁹ y hemicelulosa¹⁰ y significativamente menos lignina¹¹ que las maderas

⁶ Membrana que cubre el tallo y las hojas en ciertos tipos de plantas. Ver Glosario.

⁷ Tejido de las plantas vasculares que transporta sustancias orgánicas e inorgánicas. Ver Glosario.

⁸ Tejido leñoso de las plantas vasculares, que transporta principalmente agua y minerales. Ver Glosario.

⁹ Polisacárido que forma la pared de las células vegetales.

¹⁰ Heteropolisacáridos presentes en las paredes de las células vegetales. Ver Glosario.

¹¹ Compuesto orgánico básico de los tejidos leñosos de las plantas.

duras o blandas. La médula del tallo, por otro lado, contiene menos celulosa que la madera, aproximadamente la misma fracción de holocelulosa¹² y generalmente el mismo contenido de lignina que las especies de madera dura. Los atados de fibras (primarias y secundarias), el cámbium¹³ y el xilema leñoso están aglutinados por las resinas y pectinas¹⁴ de la planta. El proceso de aflojar las fibras de la corteza y la madera se conoce como enriado¹⁵.

Multiplicación

Existen dos formas de multiplicación, por semilla o por esqueje.

La multiplicación por semilla, a partir de una reproducción sexual es la más conocida y habitual. Consiste en que la planta macho fecunda con polen a la planta hembra generando semillas. Por lo tanto, cada planta aporta la mitad de los genes, creando variabilidad genética.

La selección de la genética se vuelve importante en este tipo de multiplicación, ya que los genes de la semilla marcan el máximo potencial de la planta. Con semillas de mala calidad no se podrán tener buenos resultados, independientemente de los cuidados que se tengan.

La multiplicación por esqueje o reproducción asexual permite que la planta genere nuevos hijos, llamados clones, sin necesidad de cruzarse con otras plantas, estos son copias perfectas de la planta madre de la que fueron cortados.

Los esquejes deben cortarse mientras la planta madre está en crecimiento, porque si llega a la etapa de floración hay menos probabilidades de éxito.

Todos los clones producidos por esquejes tendrán la misma edad que la madre, pudiendo florecer aún con un tamaño reducido y en menor tiempo luego del trasplante, comparado con una planta desarrollada desde semilla. Se debe considerar que, al tener la misma edad, todas florecerán aproximadamente al mismo tiempo. También tendrán el mismo sexo que la planta madre, evitando así problemas de sexado y disminuyendo los gastos en semillas.

Sus necesidades nutricionales, tiempos de floración y patrones de crecimiento serán idénticos.

Como desventajas de este método de reproducción, señalamos que, en caso de enfrentar una plaga, si una de ellas no es resistente, todas tendrán el mismo comportamiento.

Cáñamo Industrial y Marihuana

El cáñamo y la marihuana son plantas similares, obtenidas de cruces y selecciones del Cannabis Sativa, que dieron lugar a variedades con características diferentes y pueden seguir cruzándose entre sí.

¹² Polisacárido compuesto por hemicelulosa y celulosa.

¹³ Estrato celular de las plantas leñosas. Ver Glosario.

¹⁴ Polisacárido presente en las paredes celulares de los vegetales. Ver Glosario.

¹⁵ Maceración que permite separar la fibra la porción leñosa del tallo. Ver Glosario.

La marihuana y sus diferentes variedades son una línea genética que se caracterizan por su gran presencia de TetraHidroCannabinol (THC), componente que constituye el principio psicoactivo y una potenciación de la floración, donde se acumula especialmente una gran concentración aceites ricos en THC y otras sustancias importantes como el Cannabinol (CBN). En cambio, el cáñamo contiene bajos niveles de THC, sin efectos psicotrópicos y se desarrolló para la utilización de sus fibras.

Diferenciación morfológica

Las plantas con fines psicoactivos suelen tener no más de dos metros de altura, con muchas ramas y espesas inflorescencias, bien espaciadas unas de otras. Normalmente son seleccionadas las “hembras” y eliminados de la plantación las plantas “macho” para evitar la polinización.

Las variedades útiles para fibra se caracterizan por ser de tallo alto, con grandes espacios internodales, escasas ramas, troncos de interior poco leñoso, casi hueco. Alcanzan entre dos y cinco metros de altura. Se cultivan en alta densidad, de forma que el cultivo tiende a la verticalidad por la competición al tratar de alcanzar la luz.

Diferenciación fenotípica

Existe una fórmula que determina el fenotipo de la planta, vinculando los contenidos de THC y CBN (ingredientes psicoactivos) y el contenido de Cannabidiol (CBD) ingrediente anti-psicoactivo, de la siguiente forma: $\frac{THC+CBN}{CBD}$.

Un valor mayor a uno indica que la planta produce altos niveles de THC (cannabis psicoactivo), que se ubican usualmente en un rango de 5 a 20 % (Lachenmeier y Walch, 2005). En cambio, si la relación fenotípica es menor a uno, se trata de una variedad de bajo contenido de THC (cáñamo no psicoactivo) y suele tener concentraciones de THC inferiores a 1 % (Lachenmeier et al., 2004).



Esquema 1: Diferenciación fenotípica y morfológica

Cannabis no psicoactivo, Cáñamo con fines medicinales y Cannabis Medicinal

Existen muchos productos derivados del Cannabis y muchos estudios relacionados con el mismo. Suelen utilizarse varias terminologías para referirse al tipo de cultivo y muchas veces generan confusión al parecer sinónimos, por eso decidimos definir esos términos y esclarecer el tipo de plantas y fines de los que hablaremos en este trabajo.

En Uruguay la ley divide al Cannabis en psicoactivo y no psicoactivo, diferenciándolos fenotípicamente como explicamos anteriormente.

El decreto 246/021 de la ley n° 19.172 define el Cannabis no psicoactivo de la siguiente forma:

“...plantas, sumidades floridas o con fruto de la planta de Cannabis o partes de la planta de Cannabis, cuyo contenido de tetrahidrocannabinol sea menor al 1,0 % (uno por ciento) en base seca.”

El cannabis psicoactivo, por lo tanto, se refiere a un contenido de THC mayor a 1 %.

El término *no psicoactivo*, puede utilizarse como sinónimo de cáñamo industrial, el cual asociamos rápidamente con la utilización de fibra, que tradicionalmente es donde se emplea. Pero bien, podríamos referirnos a la producción de semillas como alimentos y más.

También dentro de la categoría no psicoactivo, existe el cáñamo con fines medicinales, donde se potencia la proliferación de las inflorescencias, para la extracción de aceites y principios activos no psicoactivos. De este tipo de plantación, surge el material de residuo a utilizar.

El cannabis medicinal, por otro lado, según la página web MedlinePlus¹⁶ (servicio de información en línea provisto por la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos) se refiere al uso de marihuana (cannabis psicoactivo) para tratar ciertas condiciones médicas.

Con este fin, puede utilizarse de forma vaporizada, fumada, ingerida. Las diferentes variedades de cannabis psicoactivo contienen diferentes cantidades de cannabinoides. Actualmente se comienzan a conocer propiedades medicinales del THC y existen medicamentos a partir de este tipo de cannabinoides, como también ya se encuentran algunos desarrollos genéticos para el cultivo específico de cannabis medicinal.

Biomasa Lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica representa la mayor fuente de energía y material renovable del planeta, y tiene por tanto un gran potencial como materia prima para la producción de celulosa, bioenergía y otros productos de interés industrial.

¹⁶ Medical marijuana. (2019, September 16). MedlinePlus. Retrieved January 25, 2022, from <https://medlineplus.gov/ency/patientinstructions/000899.htm>

La principal fuente de biomasa lignocelulósica la constituyen los cultivos forestales y agrícolas, así como también los residuos generados a partir de estos cultivos los cuales presentan interés como materia prima. Dentro de ésta última categoría se encuentra el residuo de cáñamo.

Los materiales lignocelulósicos están formados mayoritariamente por tres polímeros estructurales, que constituyen las paredes celulares de los materiales vegetales. Su proporción varía según especies y condiciones, pero generalmente cuentan con un contenido de celulosa entre un 40-50 %, hemicelulosas 20-30 % y lignina 10-30 %; así como una serie de compuestos minoritarios de bajo peso molecular solubles en agua o en solventes orgánicos y pequeñas cantidades de proteínas y sales minerales (Fengel y Wegener 1984; Sjöström 1993).

Cultivos agrícolas lignocelulósicos

La biomasa derivada de cultivos agrícolas constituye una excelente alternativa a los cultivos forestales para la obtención de celulosa, principalmente por su gran abundancia y su costo relativamente bajo. Presentan ciclos de crecimiento más cortos que los madereros, alcanzando la madurez más rápidamente. Uno de los inconvenientes que presentan es que la mayoría sólo están disponibles en ciertas épocas del año. Ejemplos de cultivos no madereros son: hierba elefante, bambú, cáñamo, lino, kenaf y yute.

Biorrefinería y Economía Circular

El término biorrefinería se atribuye a la utilización eficiente e íntegra de todos los componentes de la biomasa. Además, tiene por objeto aumentar la sostenibilidad tanto a nivel de uso de recursos naturales, a nivel técnico-económico, como a nivel medioambiental y energético.

Mediante una serie de procesos químicos, físicos y/o biológicos, la biomasa se transforma para dar lugar a una amplia variedad de productos, como productos energéticos, biopolímeros, productos químicos de base biológica o incluso producción de enzimas.

Actualmente, las biorrefinerías se colocan como una de las alternativas que puede reducir la dependencia de productos fósiles, al mismo tiempo que se optimiza el uso de los recursos naturales al aprovechar los residuos de la agricultura y otros derivados que ya no son útiles en el proceso productivo comercial.

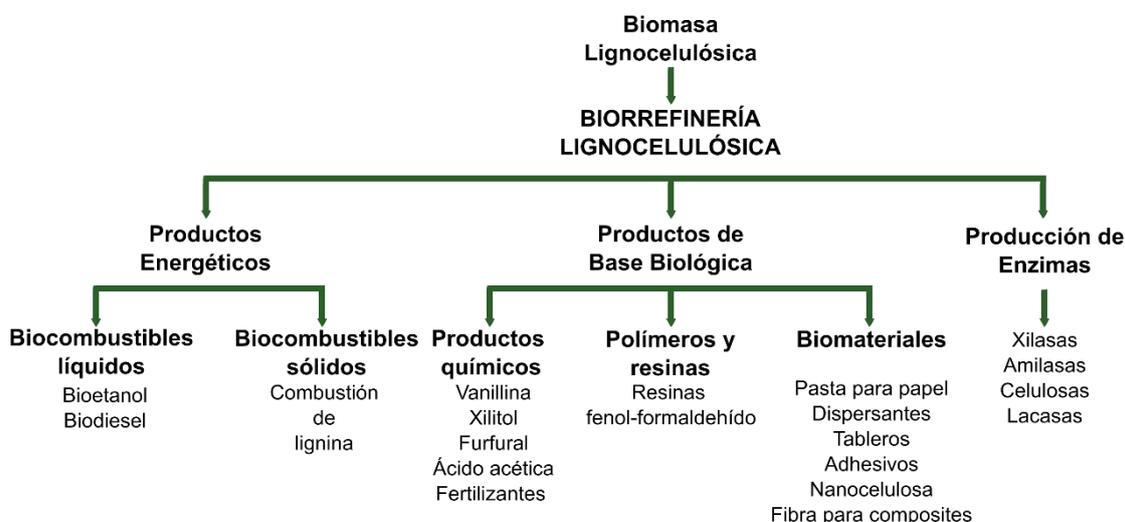
Esta lógica de aprovechamiento, a partir del reciclaje y la producción en cascada, presente en el proceso de refinación, se integra en la idea de los ciclos biológicos propuesta por la Economía Circular.

De acuerdo con la fundación Ellen MacArthur: “Una economía circular es restaurativa y regenerativa por diseño y tiene como objetivo mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor en todo momento. El concepto distingue entre

ciclos técnicos y biológicos. Impulsa objetivos estratégicos claves, como la generación de crecimiento económico, la creación de empleo y la reducción de los impactos ambientales, incluidas las emisiones de carbono.”¹⁷

Biorrefinería Lignocelulósica

La biorrefinería de material lignocelulósico consiste en la utilización de todos o de la mayoría de los componentes de la lignocelulosa (celulosa, hemicelulosas y lignina) como se muestra en el esquema 2. El alto grado de entrecruzamiento que existe entre los constituyentes lignocelulósicos es una de las principales barreras para el desarrollo de esta biorrefinería, tanto por la resistencia de la matriz lignocelulósica a su degradación (Zhang et al. 2007), como por su insolubilidad en la mayoría de los disolventes (Zakzeski et al. 2010), de todas formas, se investiga en procesos enzimáticos que puedan generar bajos impactos medioambientales, sustituyendo a los procesos más nocivos. Actualmente, los principales procesos de biorrefinería de materiales lignocelulósicos son la producción de celulosa y de bioetanol.



Esquema 2: Productos derivados de una biorrefinería lignocelulósica
Basado en Figura 15, Campos, A. R. (2014).

En Uruguay se encuentra ALUR-Bella Unión, una empresa agroindustrial sustentable, 90 % estatal. Procesa diferentes materias primas, desde cultivos como cereales, oleaginosos y caña de azúcar, hasta aceite reciclado y grasa animal, obteniendo diversos productos como biodiesel, bioetanol, químicos, harinas proteicas (alimento animal), energía eléctrica, glicerina y azúcar¹⁸.

Los materiales lignocelulósicos para su uso y aprovechamiento suelen requerir de pretratamientos para el acondicionamiento del material o para la extracción de ciertos

¹⁷ Delivering the Circular Economy: A Toolkit for Policymakers, EllenMacArthur Foundation 2015 - Traducción de la versión original en inglés.

¹⁸ Extraído de: <http://www.alur.com.uy/empresa/que-es-ALUR.php>

componentes según sea el interés. Estos pretratamientos a su vez, generan licores con múltiples posibilidades de valorización, llegando a productos finales como químicos altamente específicos para diferentes industrias, como la farmacéutica, gasificadoras y hasta panificadoras.

El cannabis en Uruguay y el mundo

La actualidad en Uruguay

Según lo publicado por Uruguay XXI en su informe de septiembre de 2021, el sector del cannabis goza de un incremento en su desarrollo, tanto a nivel de sus legislaciones, como a nivel de inversiones, investigación y desarrollo de productos.

Con la aprobación de la ley n° 19.172¹⁹, en Uruguay se regula la producción, la comercialización y el cultivo desde finales de 2013, siendo pioneros en la legislación de la planta para sus diversos usos. Dicha ley establece la creación del Instituto de Regulación y Control del Cannabis, IRCCA, encargado de regular y fiscalizar todas las etapas del proceso, desde la plantación hasta la comercialización. Múltiples decretos han promovido la investigación científica tanto del cannabis psicoactivo, como del no psicoactivo.

Esta regulación permite que tanto empresas internacionales como nacionales comiencen a operar, generando nuevos puestos de trabajo. El Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS) estima que el personal ocupado directamente por el sector en 2020 se haya incrementado en más de 1.070 personas.

El aumento de plantaciones es un reflejo del aumento de la producción y de las exportaciones, pues en el año 2020 se exportaron 10 toneladas de flores de cannabis y hasta julio de 2021, la exportación fue de 7 toneladas. Esta producción abarca flores, extracto básico, cannabinoides puros, medicamentos y sintéticos.

A pesar de la diversidad productiva, el 95 % de las empresas se dedica a la producción de flores hembra para exportación, según datos del MGAP y gran parte posee licencias para obtener extracto crudo de CBD, principal producto de exportación a nivel mundial, en lo referido a cannabis medicinal.

Por su experiencia y conocimiento en el campo, Uruguay tiene una larga historia en la industria farmacéutica y se ha posicionado como un distribuidor en el cono Sur, apoyado principalmente por el decreto 282, que habilita las operaciones logísticas y el depósito de productos terapéuticos de cannabis medicinal, que luego de importados podrán ser redistribuidos en la región. Además, está autorizada en nuestro país la venta bajo receta profesional de tres líneas de medicamentos basados en CBD, utilizados para el tratamiento de la epilepsia refractaria, Parkinson y artrosis.

La intensa actividad desarrollada a nivel local despertó el interés de empresas internacionales, que buscan asentarse aquí. Podemos citar los casos de algunas empresas, por ejemplo, la canadiense RAMM Pharma que adquirió a la procesadora de aceite y extractos de CBD italiana Canapar, que hoy en día opera en nuestro país.

¹⁹ La llamada ley de “Regulación y Control Del Cannabis”, fue promulgada el 20 de diciembre de 2013 y publicada el 07 de enero de 2014.

La empresa brasilera The Green Hub se instaló en Uruguay en mayo de 2021 y funciona como una incubadora para las startups relacionadas al cannabis, invirtiendo y aportando capital intelectual a las empresas. Este tipo de iniciativas son fundamentales, porque la curva de aprendizaje es el primer desafío que enfrentan las empresas que desean trabajar con cannabis, pues la prohibición que existió durante muchos años provocó una falta de conocimiento sobre el manejo del cultivo.

Las licencias de investigación contabilizadas en el ámbito privado a la fecha de abril de 2021 ascienden a 23, pero además existe la participación de instituciones públicas, como la Universidad de la República, que posee convenios con universidades del exterior.

Existen también más de 25 grupos de investigación y desarrollo, que en su mayoría abordan el uso medicinal. Otros se han enfocado en la investigación y la fase agrícola.

Es en la fase agrícola, donde comienza la cadena productiva. Los cultivos de cannabis no psicoactivo están distribuidos en distintas zonas del país y su presencia se extiende por 14 de los 19 departamentos, como veremos en el siguiente mapa.

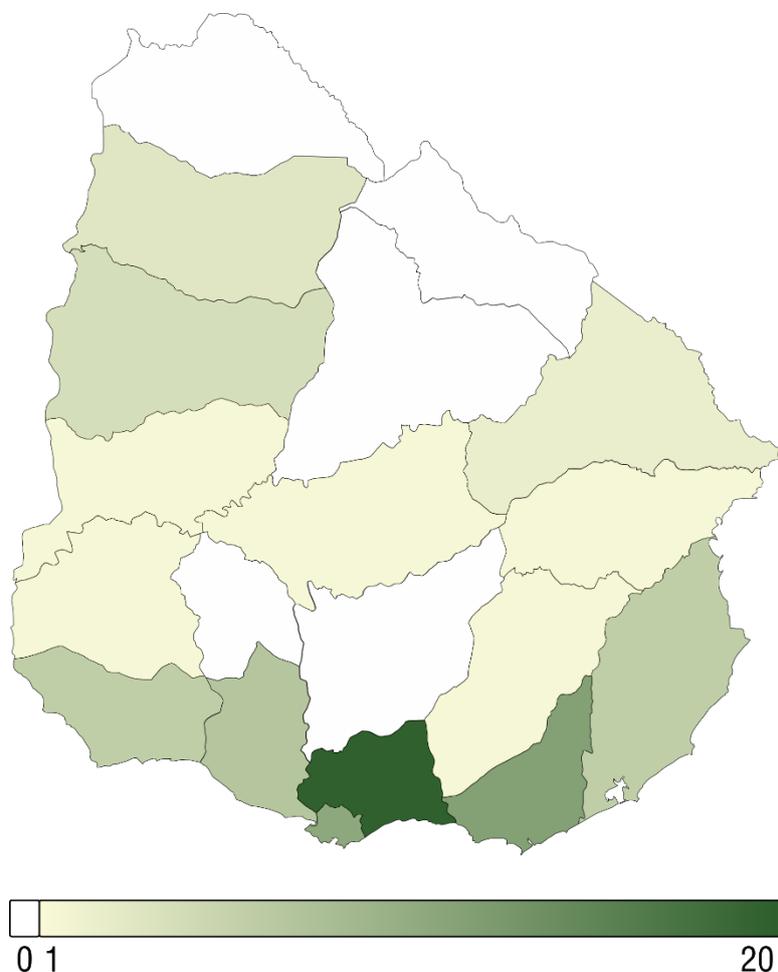


Imagen 3: Cantidad de plantaciones registradas por departamento
Datos publicados por Uruguay XXI (Setiembre 2021)

Es interesante observar que la actividad de la gran mayoría de las empresas se centra en el cultivo, como se puede ver en la siguiente tabla, pero también existe una retroalimentación impulsada entre actividades que a simple vista parecen no estar directamente relacionadas, como la enseñanza y el turismo.

CULTIVO (88)	EXTRACCIÓN (9)	PRODUCCIÓN FINAL (7)
USO MEDICINAL (8)	EXTRACTOS	ALIMENTOS
USO NO MEDICINAL (80)	RESINAS	COSMÉTICA
SEMILLAS (3)	TINTURAS	MEDICAMENTOS
GRANOS (4)	ACEITES	VETERINARIA
FLORES (73)		
SECADO INDUSTRIAL (10)		

Tabla 1: Cantidad de empresas vinculadas al Cannabis y sus rubros
Datos publicados por Uruguay XXI (Setiembre 2021).

Mercado internacional

América Latina es una de las regiones donde se espera que este crecimiento sea más pronunciado, pues la despenalización de los cultivos de cannabis propicia un marco legal para el desarrollo de las actividades antes mencionadas. A su vez, el acceso y la disponibilidad de productos realimentan el desarrollo del mercado. Los bajos costos productivos, que pueden ser hasta un 80 % inferiores a los norteamericanos; y las favorables condiciones climáticas, propician las inversiones, siendo Uruguay y Colombia los principales productores del continente. Este último país invirtió alrededor de 200 millones de dólares, generando unos 11.000 puestos de trabajos para un área que supera las 620 hectáreas. Las investigaciones realizadas en el continente produjeron el registro de 16 medicamentos vinculados al cannabis en 2020.

La falta de legalización a nivel global es un impedimento para el desarrollo de la industria del cannabis, existiendo una mayor regulación del uso medicinal, que está más extendida por sobre la del uso recreativo. Hasta septiembre de 2021 se conoce que Uruguay y Canadá son los dos únicos países que poseen una normativa que abarca ambos usos, es decir, tanto el medicinal como el recreativo. Sin embargo, el hecho de que muchos países habilitan el consumo medicinal o incluso el recreativo, pero sin permitir la realización de las etapas productivas, incentivan el comercio internacional, pues su normativa los convierte netamente en importadores de cannabis.

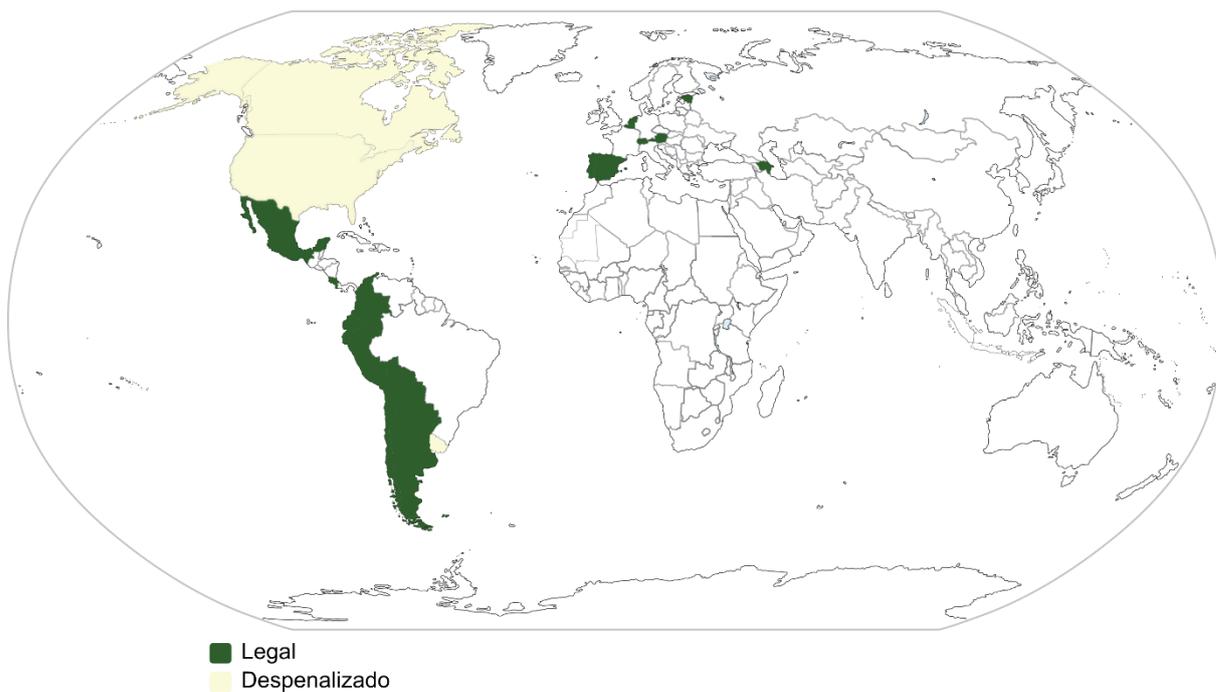


Imagen 4: Países donde el Cannabis recreativo es legal
Datos publicados por Uruguay XXI (Setiembre 2021)²⁰

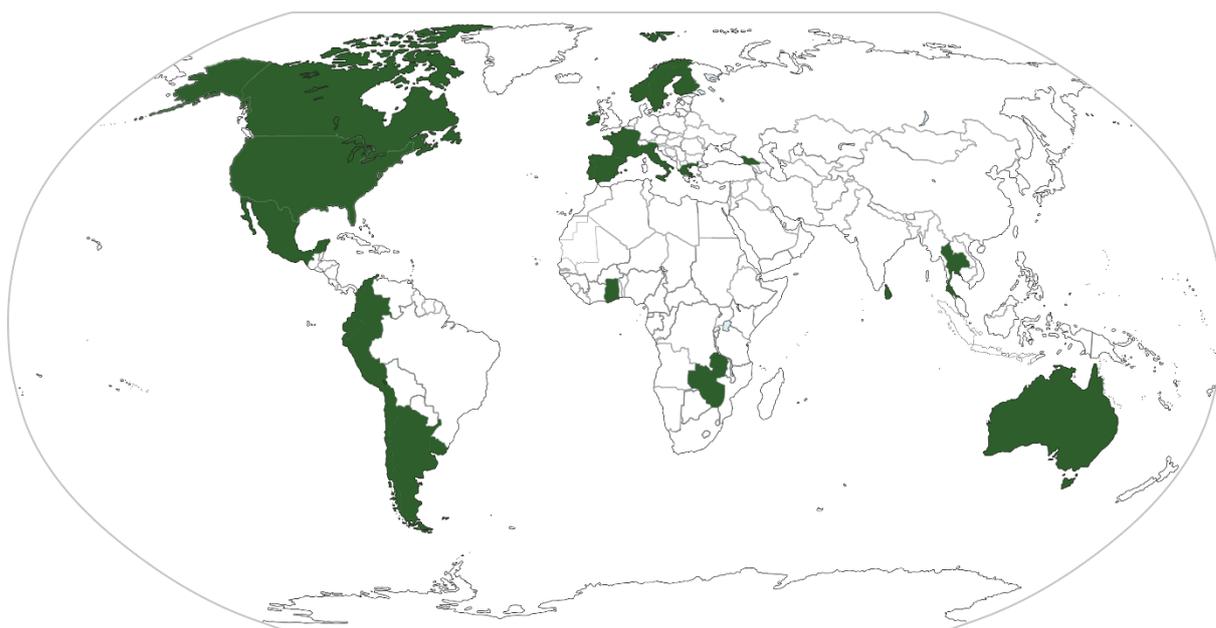


Imagen 5: Países donde el Cáñamo medicinal es legal
Datos publicados por Uruguay XXI (Setiembre 2021)²¹.

A pesar de las normativas legales compartidas por el bloque europeo, la situación en ese continente es diferente para cada país. Existe un espíritu generalizado que busca

²⁰ En el caso de Estados Unidos, la legislación depende del estado, no del país.

²¹ En el caso de Estados Unidos, la legislación depende del estado, no del país.

la legalización y lucha contra posturas más conservadoras, como la española, donde todavía está prohibido el consumo medicinal.

La aplicación del cannabis en sectores y productos

La participación del cannabis a nivel mundial también se observa en sectores como belleza, bienestar y alimentación animal, pero sin duda, el sector que genera más valor agregado es el farmacéutico. En la rama alimenticia, además de aceite, harina y semilla, se elaboran cereales, bebidas, snacks y golosinas.

La excelente calidad de los aceites y la cantidad de proteínas presentes en los granos son la base del potencial alimenticio del cannabis.

Los granos cuentan con un porcentaje de aceite que oscila entre un 30 y 35 %, con una alta proporción de ácidos grasos esenciales. Su harina posee, además, altos niveles de proteínas, carbohidratos y fibra. Pueden ser consumidos por personas que deseen tener dietas de alto contenido proteico, como sustituto para la fabricación de productos lácteos, e incluso como complemento dietético para mascotas.

En lo referente a bebidas, la cervecera Corona invirtió 3.800 millones de dólares para comprar el 9 % del paquete accionario de la empresa canadiense Canopy, buscando operar con cannabis en parte de su producción.

Un gran ejemplo del uso en medicamentos consiste en el logro realizado por la empresa Jazz Pharmaceuticals, que licenció el medicamento basado en CBD llamado Epidiolex, indicado para el tratamiento de ciertos tipos de epilepsia en niños. Este medicamento fue autorizado en el año 2018 por la Food and Drug Administration (FDA) de Estados Unidos y actualmente está aprobado en la mayor parte de Europa, Australia y algunos países de Latinoamérica. Las ventas en 2020 alcanzaron 526 millones de dólares y se estima que podrían rondar los 930 millones de dólares en 2021.

Podemos citar también el caso del medicamento Dronabinol, basado en THC sintético, cuyos usos principales son la reducción de los malestares producidos por la quimioterapia y el estímulo del apetito en pacientes con SIDA.

Antecedentes en el uso de residuos vegetales

Existen numerosos ejemplos a nivel mundial, e incluso en la región, que muestran formas de aprovechar los residuos vegetales.

Ewar ®: Tablones de plástico desechado y cáscara de arroz

La empresa argentina Ewar® convierte cáscara de arroz en tablones que buscan reemplazar a la madera en aplicaciones exteriores (ver imagen 6). Usando una matriz de plásticos desechados por otras industrias²², desde su fábrica en la localidad de La Plata logran incorporar al mercado este producto que posee superiores prestaciones que la madera usada en intemperie. Sus beneficios radican en que no precisa mantenimiento. No absorbe humedad (evitando la acumulación de hongos), no es atacado por insectos, no necesita pintura o barniz, no se raja y no genera astillas. Si bien no es biodegradable, este material es reciclable y no utiliza químicos peligrosos, como el caso de las maderas tratadas con cobre, cromo y arsénico (CCA), que resultan altamente contaminantes.



Caminería en piscina



Deck exterior

Imagen 6: Utilización de tablas de material biocompuesto
Ambas publicadas en el sitio web <https://www.ewar.com.ar/que-es-ewar>

Maglione: Paneles con cáscaras de maní y resinas

También en Argentina, se realizó una experiencia por parte de la empresa Maglione y el Centro Estatal de Vivienda Económica de Córdoba, organismo que depende del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), donde se estudió la viabilidad técnica, económica y ambiental, del desarrollo de paneles con cáscara de maní, para su uso en la fabricación de viviendas económicas. Argentina se encuentra dentro de los 10 mayores productores de maní a nivel mundial y cuenta con desecho anual de 300.000 T²³ de cáscaras.

²² Según su página web, por cada m² de tablas producidas, reutilizan 15kg de plásticos desechados por otras industrias.

²³ Datos divulgados por TV pública argentina el día 9 de enero de 2016, en una entrevista a la Dra. en Ciencias del Diseño Mariana Gatani, del CONICET. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=Inbn2VMstXM>

Para ese estudio, cáscaras, tallos y hojas fueron mezcladas con resinas e incorporadas en moldes para luego ser prensadas con calor. La Dra. Mariana Gatani considera que su experiencia fue satisfactoria, al generar muestras que cumplen sus expectativas mecánicas, biocidas, térmicas, acústicas e hidrófugas, con un costo de fabricación 20 % inferior al de los paneles de madera.

Tanto las mesas, como la barra del café y museo propiedad de la empresa Maglione, fueron fabricadas usando paneles creados durante este desarrollo de material (ver imagen 7).



Mesa hecha con panel

Acercamiento a la superficie

Imagen 7: Utilización de paneles de material biocompuesto
Imágenes del vídeo disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=lnbn2VMstXM>

Betik: Productos descartables con fibras vegetales variadas

Otro ejemplo del uso de material vegetal lo encontramos en la empresa española Betik²⁴, que dentro de su línea ecológica fabrica platos descartables, bowls y bandejas a partir de hojas de palmera que caen naturalmente, caña de azúcar, pulpa de trigo, fibra de bambú y cubiertos descartables, de almidón de maíz.



Imagen 8: Productos ecológicos de la empresa Betik

Todos estos productos se caracterizan por ser compostables y biodegradables y buscan sustituir a los artículos plásticos de un solo uso.

²⁴ Empresa española que desde 1940 produce mondadientes y una gran variedad de envases para el sector alimenticio, medicina, etc.

Manejo del cultivo en campo

Existen factores que afectan las características de la planta, determinando su estructura física y su composición química. Estos factores son: método de cultivo, ambiente climático, y momento de cosecha.

Es importante conocer y describir estas variables, para determinar las características de la posible materia prima con la que se cuenta.

Toda la información brindada en esta sección surge del trabajo de campo realizado en el período de cosecha de marzo del 2020. Fue recabada mediante visitas a plantaciones y plantas de procesamiento, entrevistas a productores y empresarios del sector y relevamiento fotográfico.

Para la selección de la información nos basamos en el objetivo de conocer los procesos de manejo del cultivo, generación y manejo del residuo, así como el flujo productivo en la selección de inflorescencias.

Se ha elegido estudiar y trabajar con cultivos en campos a cielo abierto, con una extensión mayor a 5 hectáreas por el volumen de residuo obtenido y las problemáticas que acarrea su manipulación.

Para las descripciones del manejo, nos centramos fundamentalmente en tres productores que tomamos como modelo al compartir características como distribución del cultivo, riego, finalidad de la cosecha y también el tipo de suelo, por encontrarse en zonas cercanas.

Estos cultivos se encuentran en nuestro país, en la zona noreste del departamento de Canelones (ver imagen 9). Las plantaciones que denominaremos como “plantación A”, “plantación B” y “plantación C”, ocupan una extensión de 6 ha, 12 ha y 100 ha, con fines medicinales principalmente.



Imagen 9: Zona de cultivo de plantaciones relevadas
Google (s.f.). [Departamento de Canelones]. (19 de enero, 2022). Google Earth.

Generación de Plantines

Los datos de producción de plantines fueron obtenidos a partir de las entrevistas realizadas, por lo tanto, los métodos y tiempos se adecúan al clima de la región, más precisamente Canelones.

Para la multiplicación de plantas se utilizan los dos métodos de reproducción descritos anteriormente: multiplicación por semilla y por clon o esqueje

Un dato importante al momento de elegir los métodos de reproducción pueden ser sus costes. En este sentido, según datos brindados por productores, sólo de mano de obra para obtener 70.000 plántulas a partir de semillas se requerirían 25 jornales de trabajo y para la misma cantidad, pero por reproducción por esquejes o clones se necesitarían 350 jornales, en períodos de 25 a 30 días para semillas y 40 días para clones.

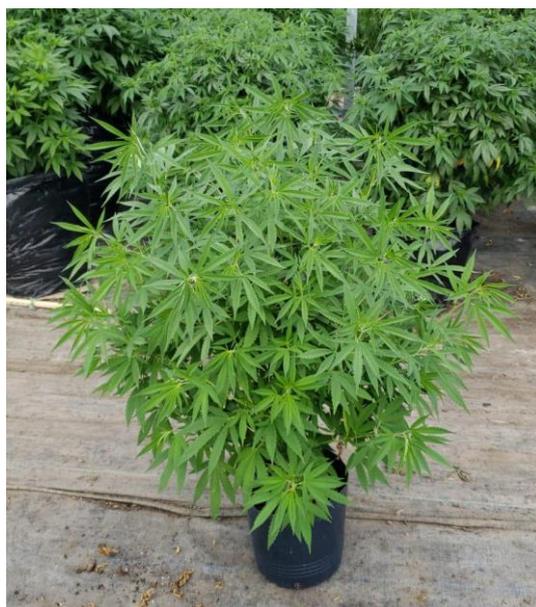


Imagen 10: Plántulas de Cáñamo Medicinal
Izquierda: plantín para trasplante a maceta.

Derecha: planta lista para ser trasplantada a campo o maceta más grande.

Plantas a partir de semillas:

Hasta el momento no hay producción en Uruguay de semillas de cáñamo. Las mismas se importan de la Unión Europea, Canadá, Australia o China. Existe una amplia gama genética, que incluyen semillas con fin de obtención de granos alimenticios, para fibra, inflorescencias, doble propósito (fibra e inflorescencia), dioicas, monoicas, con altos y bajos niveles de THC, etc.²⁵

²⁵ Ing. Ibarra, A. Mariela. "Cáñamo en Uruguay" Presentación para Expocannabis, MGAP.

El proceso comienza con la germinación de la semilla. Para que esta germine requiere de abundante humedad, por esto unos de los métodos que se utiliza consiste en la activación de la semilla por medio de remojo durante aproximadamente 12 horas.

Luego de este tiempo las semillas son plantadas en almaciguera utilizando turba rubia²⁶ como sustrato. A partir del tercer o cuarto día comienzan a germinar.

Para el correcto desarrollo de la plántula se requieren temperaturas de entre 21 y 24 °C, exposición prolongada a luz solar o artificial por su gran demanda de la misma. La experiencia de algunos productores en la germinación en cámaras sin luz, no fue tan satisfactoria como con luz.

Luego de 25 o 30 días la planta es apta para ser trasplantada en campo o en macetas mayores.

Plantas a partir de clones:

Es el método más adecuado para plantaciones de baja escala. Consiste en mantener la planta madre en etapa vegetativa, sometiéndola a un régimen lumínico que no le permita pasar a etapa de floración.

Se intenta mantener el esqueje en alta humedad y temperaturas de un poco más de 20 °C hasta que enraíce, en un periodo aproximado de 40 días.

Condiciones

En la plantación de cáñamo con fines medicinales se busca la máxima posibilidad de floración de la planta. Este fin determina cuál será el porte y la distancia adecuada entre ellas.

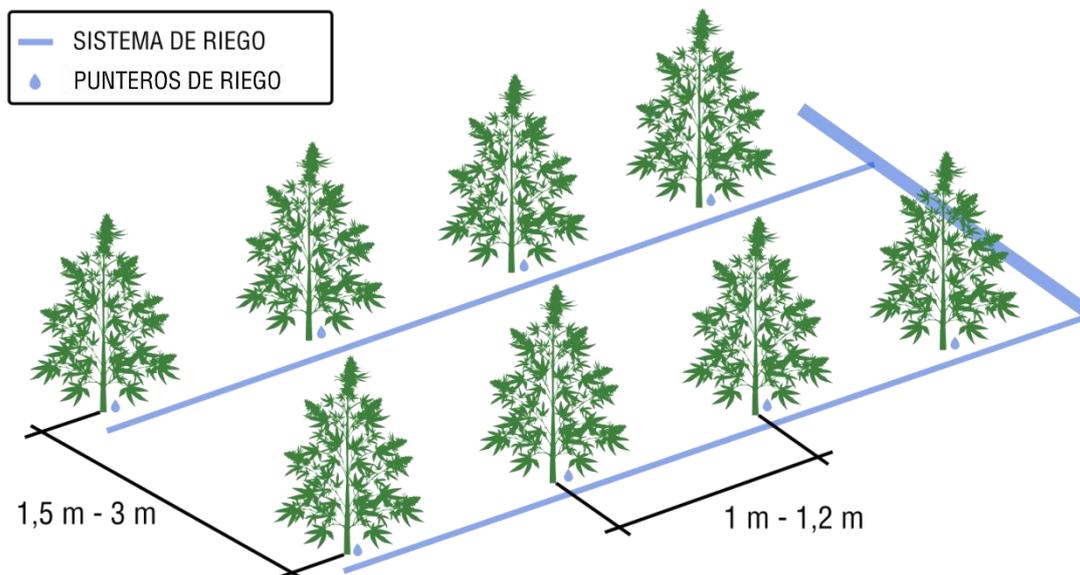
Se trata de un cultivo de verano que requiere gran exposición a luz y calor, por lo que suelen ser trasplantadas a suelo alrededor de noviembre en el hemisferio Sur, cuando la temperatura ya se ha establecido entre templada y cálida; y las horas de luz diarias permiten el desarrollo vegetativo de la planta. Este período se extiende por 45 días, pasando luego a la etapa de floración.



Imagen 11: Plantación de Cannabis Medicinal en Canelones

²⁶ La turba rubia es un sustrato con un nivel de pH levemente ácido, que se origina en las zonas donde han convivido especies vegetales en un ambiente con un alto nivel de humedad, por ejemplo, en zonas pantanosas. Fuente: Turba Rubia: Características, usos y propiedades. (n.d.). <https://www.sembrar100.com/turba/rubia/>

Observamos que en el surco la distancia entre plantas suele ser de 1 o 1,20 m dependiendo de la variedad y del productor. Esta distancia garantiza que su follaje recibirá la cantidad de luz necesaria para desarrollarse, evitando así la competencia y el crecimiento vertical. La distancia entre surcos puede variar entre 1,5 y 3 m aproximadamente, dejando un sendero adecuado para las dimensiones de la maquinaria utilizada. Con estas distancias se obtiene una densidad promedio de 3500 plantas por hectárea (ver esquema 3).



Esquema 3: Cultivo de cáñamo con fines medicinales

Para propiciar la multiplicación de las ramas secundarias y obtener una mayor cantidad de inflorescencias se realiza una poda apical²⁷. Contrario al caso de plantaciones con fines para fibra, donde se busca aumentar densidad del cultivo dando como resultado plantas de mayor altura.

Se utiliza el riego por goteo para aportar el agua necesaria, normalmente utilizando goteros con caudal de 4 l/h. Esto implica una fuente de agua, una fuente de energía eléctrica y la inversión de capital en bombas, cañerías y todo el paquete tecnológico necesario en una instalación de este porte.

En la medida que las plantas se desarrollan se puede identificar especímenes machos, los cuales no son deseados en una plantación con fines medicinales, ya que su presencia implica la fecundación de las hembras y la generación de semillas. Al ser identificados los machos se eliminan de la plantación. Actualmente el desarrollo genético permite la obtención casi única de plantas hembra, disminuyendo ampliamente la problemática de la fecundación.

²⁷ Este tipo de poda consiste en cortar el ojo central para desviar el flujo de savia hacia las ramas secundarias, haciendo que su producción floral se distribuya entre ellas. Fuente: Poda apical: cómo se hace y cuándo aplicarla. (n.d.). <https://www.cosechalibre.com/Poda-Apical-Como-y-Cuando/>

Se observaron problemáticas logísticas en el momento de la cosecha por la floración de grandes cantidades de plantas al mismo tiempo, más de las que pueden ser procesadas en un día. Para evitar esto, en ocasiones, se utilizan focos nocturnos que pueden alargar el período vegetativo de la planta, otorgando mayor tiempo para cosechar. Otra forma de contrarrestar esto es controlar los momentos de generación de plántines o trasplantes para obtener pequeñas diferencias (de días) en la edad de las plantas.

Suele verse en las plantaciones el uso de nylon como Mulch, lo que provoca beneficios y e inconvenientes. El nylon Mulch se utiliza como control de malezas y mantenimiento de la humedad del suelo, pero a su vez, genera un ambiente ideal (de humedad y calor) para la multiplicación de los hongos de raíz, que puede llegar a acabar con la planta en la mayoría de los casos. Este problema se observó en todas las plantaciones.

El nylon es descartado y colocado nuevamente cada año, generando también una gran cantidad de residuos plásticos.

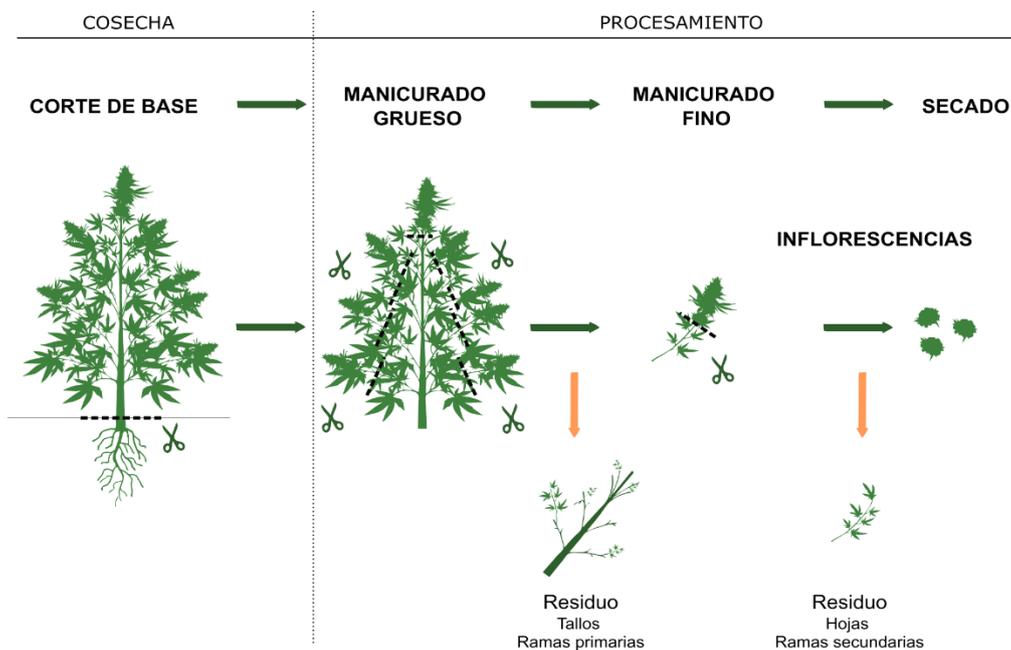
Cosecha

En Uruguay la cosecha se realiza a inicios del otoño, entre mediados de marzo y abril, dependiendo de la variedad.

El objetivo es cortar la planta desde la base del tronco, en el momento óptimo de maduración de la inflorescencia.

La técnica para la cosecha puede variar entre manual y parcialmente mecanizada, pero ambos métodos finalizan con el retiro completo de la planta, sin dejar más residuos en campo, que la raíz enterrada.

Procesamiento



Esquema 4: Procesamiento del cáñamo medicinal

Los métodos de procesamiento y secado dependen de los requerimientos y exigencias del producto final (por ejemplo, fines medicinales o extracción de aceites para productos farmacéuticos), pero el encadenamiento dentro del proceso sigue un cierto orden en todos los casos.

Luego de la cosecha, el cultivo es trasladado a la planta de procesamiento que puede estar en la misma plantación o en otra ubicación. Cabe destacar que hay empresas que se dedican exclusivamente a la plantación, tercerizando las etapas siguientes.

Manicurado Grueso

Al llegar al lugar de procesamiento las plantas enteras se depositan en la zona donde los operarios comienzan con el manicurado grueso. Este proceso consiste en separar de forma manual la rama con las inflorescencias útiles del resto, aislándola de los tallos, las ramas finas y las flores pequeñas.

En este punto se generan la mayor parte de los residuos. Las ramas gruesas y tallos vuelven al campo, donde en el mejor de los casos, son quemadas a cielo abierto.

Manicurado Fino

El manicurado fino puede realizarse de forma manual o mecánica, con una máquina llamada descogolladora.

El método manual consiste en separar las inflorescencias del tallo con tijeras, para luego retirar las pequeñas hojas restantes.

El método mecánico consiste pasar las ramas por un agujero de diámetro determinado. La rama es desplazada a través dos cilindros que se encuentran en el otro extremo, separando así la flor del tallo, obteniendo un rendimiento 5 veces mayor frente al método manual.



Método 1 MANUAL



Método 2 MECÁNICO

Imagen 12: Procesos de manicurado fino

Secado

Las flores limpias se colocan en cajones de plástico para luego ser llevadas a la zona de secado. Los secadores suelen ser habitaciones con ventilaciones en las paredes, que hacen circular el aire de forma homogénea, a una temperatura estable, donde las flores permanecen por períodos de siete días aproximadamente.

Luego del secado las flores están listas para ser empaquetadas y/o almacenadas.



Imagen 13: Inflorescencias listas para el secado en cámara

Observaciones

- Respecto al manejo general y las características de las plantaciones se ven grandes similitudes entre las diferentes producciones, obteniendo plantas de similar porte. Cada productor establece su forma de trabajo en función de sus recursos, la extensión de sus cultivos, sus conocimientos y el acceso a la tecnología.
- Existen productores que incorporan en mayor o menor medida métodos para el registro de las actividades y de la producción, como también profesionales que acompañan y mejoran los procesos, denotando un orden y mostrando predisposición a la mejora continua.
- Se observaron plantaciones donde la logística del cultivo y sus residuos no eran los más eficientes, generando grandes pérdidas en tiempo y combustible.
- En aquellos cultivos donde se procesaba y secaba el material y no existía un flujo de trabajo claro, se observó acopios de material a procesar y mayor cantidad de operarios, que en etapas iguales en otras plantas de procesamiento donde el mismo trabajo se realizaba de forma más eficiente. Esto conlleva la degradación de las inflorescencias, al ser un material vivo que se degrada en función del tiempo si no se mantiene con las condiciones adecuadas.

Conclusiones del manejo del cultivo

- El manejo del cultivo y el momento de la cosecha definen las características morfológicas y las propiedades mecánicas y químicas de la materia prima a obtener (consideramos al residuo como nuestra materia prima).
- Es una gran ventaja que los residuos se obtengan durante la etapa de floración, porque presenta una menor lignificación de las fibras en esta etapa de crecimiento (las fibras muy lignificadas no favorecen el proceso de enriado) y su pérdida de celulosa es menor, ya que a medida que la planta madura, comienza a disminuir su porcentaje (Ming, L. et al., 2015).
- Se han realizado investigaciones donde se comprueba que la lignina aumenta y la celulosa disminuye en función del tiempo de maduración de la planta, siendo un momento óptimo y recomendable la cosecha en floración si se quieren aprovechar las máximas características de la fibra (en este caso representan al residuo en el proceso de separación de las inflorescencias). Mediavilla et al. (2001) informaron una reducción en el rendimiento y la calidad de la fibra después de la etapa de floración, debido a la formación de fibras secundarias, aunque también es sabido que las fibras primarias de los cultivos con fin medicinal no son tan largas como las de los cultivos destinados a la producción de fibra. El porte de las plantas con fines medicinales es más pequeño y robusto, resultado de la poda para la formación de ramas secundarias.
- Por lo tanto, el material obtenido como residuo en las plantaciones de cáñamo medicinal (tallos y ramas primarias), se cosecha en el punto óptimo para su aprovechamiento.

El residuo en Uruguay

Manejo del residuo

El residuo de cáñamo seleccionado para este trabajo se genera en la etapa de procesamiento llamada “manicurado grueso” y se compone de tallos y ramas primarias. Actualmente en la normativa uruguaya no se encuentra preestablecido el destino de los productos secundarios, pero es obligatorio especificar los productos a comercializar al momento de solicitar la licencia²⁸. Por lo tanto, no existe un protocolo para el manejo y descarte de los residuos, por ser un producto secundario sin un destino comercial.



Imagen 14: Residuo de cáñamo acumulado en el campo

En las tres plantaciones visitadas se realizan diferentes acciones para centralizar el residuo o eliminarlo. En uno de los casos los tallos y ramas fueron quemados, en otro caso se incorporaron al suelo y en el último se secaron bajo invernáculo, para luego ser triturados y enfardados.

Observaciones

El residuo permanece ocupando grandes secciones de los campos por largos períodos de tiempo, en algunos casos cubierto con nylon, generando un ambiente propicio para la formación de hongos que manchan el material que podría ser valorizado y que también degradan componentes que podrían ser extraídos.

Las condiciones de degradación en las que se encuentra el material actualmente lo vuelven difícil de aprovechar. En caso de realizar una valorización del residuo, sería necesario estandarizar las condiciones para mantener el contenido de los componentes lignocelulósicos dentro de los valores deseados. Para este fin, se debe evitar depositar el material a cielo abierto por tiempos prolongados para que no se produzca de forma natural el enriado.

²⁸ Información brindada por IRCCA, enero 2022.

Cálculo de cantidad de residuo en Uruguay

Con el objetivo de conocer cuánto material podría ser valorizado se realizó un cálculo aproximado de la cantidad de residuo agrícola anual, a nivel nacional, ya que ese dato es inexistente hasta el momento.

Para el cálculo, se pesaron 10 plantas adultas de cultivos de cáñamo con fines medicinales recién cosechadas, para obtener un promedio por planta en base húmeda.

Se utilizaron datos brindados por productores para calcular el promedio de plantas por hectárea y datos de organismos públicos para conocer la superficie de cultivo en el país, llegando a un cálculo de residuo anual por hectárea y un aproximado de residuo anual a nivel nacional.



Imagen 15: Secado del residuo de Cáñamo
Izquierda: Secado en invernadero. Derecha: Secado en campo.

En promedio se obtienen 1,3 kg de tallos y ramas primarias en base húmeda por planta. La densidad de cultivo para este tipo de plantaciones en exterior es aproximadamente de 3500 plantas por hectárea, lo que da como resultado 4550 kg/ha en base húmeda. Teniendo en cuenta que en 2021 se cultivaron 456 ha²⁹, obtendremos como resultado 2075 T de residuo en base húmeda para ese año.

Se debe tener en cuenta que esta cifra varía cada año según el crecimiento o decrecimiento del sector en el país. Por ejemplo, en 2020 según datos brindados por el MGAP se habían destinado 800 ha para el cultivo de cannabis en Uruguay con diversos fines, pero principalmente en el área medicinal.

²⁹ Uruguay XXI. (Setiembre 2021). Sector Cannabis en Uruguay.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/cannabis/>

Caracterización química del residuo en Uruguay

Los datos bibliográficos encontrados centran su foco en estudios realizados en cultivos de cáñamo industrial y no en cultivos donde la finalidad es la cosecha de las inflorescencias, donde cambian las características morfológicas de la planta y su manejo en general. Por lo tanto, no se conocen datos que muestren las particularidades de los residuos obtenidos en este tipo de cultivo.

Esto motivó la realización de los análisis para la caracterización principalmente química del residuo en nuestro país, por ser necesarios para cualquier propuesta de investigación y valorización que se desee realizar con este residuo.

Se determinó diámetros de fibras mediante microscopía electrónica, tenor de hemicelulosa, holocelulosa, celulosa, lignina, también contenidos de humedad, extractivos, volátiles y cenizas.

Las muestras para los estudios realizados se obtuvieron de las tres plantaciones (A, B y C) que tomamos como modelo, mencionadas en el apartado “Manejo del cultivo”.

Se analizaron tallos enteros en base seca (sin separación entre sección leñosa y fibrosa) sin tratamiento previo y por otro lado se estudió la fibra primaria, en base seca y luego de un proceso de enriado³⁰.

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de CENUR NORESTE, sede Tacuarembó, de la Universidad de la República, de acuerdo con los protocolos del US National Renewable Energy Laboratory (Sluiter et al., 2011) y a Métodos de análise em química da madeira. série técnica (Abreu et al., 2006).

³⁰ Proceso de fermentación con el objetivo de separar fibras de sección leñosa. Ver definición completa en Glosario.

Resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados se muestran en la tabla 2 y corresponden a los valores del tenor de hemicelulosa, holocelulosa, celulosa y lignina soluble e insoluble. Los resultados de los demás ensayos pueden ser consultados en Anexo I.

Muestra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Holocelulosa (%)	Lignina Soluble (%)	Lignina Insoluble (%)
1 Tallos Ent P1	28,6	36,7	68,6	10,4	3,4
2 Tallos Ent P2	50,5	29,2	56,5	9,9	3
3 Fibra Tallo P2	55,1	35,7	65,6	12,1	1,2
4 Fibra Tallo P3	-----	15,4	51,8	14,9	2,1
5 Fibra Rama P2	38,6	20,9	72,8	14,1	2,5
6 Fibra Rama P3	57,4	13,4	75,3	11,1	1,8

Tabla 2: Tenor de holocelulosa, celulosa y lignina en las muestras

En lo referente a la fibra, el estudio de microscopía electrónica determinó los valores de diámetros de las fibras para las diferentes muestras.



Imagen 16: Microscopía óptica de fibra del residuo de cañamo

Muestra	Diámetro sup. (µm)	Diámetro central (µm)	Diámetro inf (µm)
3 Fibra Tallo P2	11,28	14,15	11,20
4 Fibra Tallo P3	11,25	13,96	13,96
6 Fibra Rama P3	14,72	21,31	24,80

Tabla 3: Diámetro de las fibras

Tal cual se expresa en el trabajo “Development of Hemp Fibers: The Key Components of Hemp Plastic Composites” realizado por Tatyana Chernova (2017), “las dimensiones finales obtenidas de las fibras primarias del floema en el cáñamo industrial pueden diferir según la variedad y las condiciones de crecimiento. La longitud final de dicha fibra oscila entre 5.000 y 100.000 µm, con una moda de alrededor de 20.000 µm y variaciones en los diámetros de las fibras, que pueden oscilar entre 15 y 40 µm.” Por lo tanto, los diámetros de fibra obtenidos se encuentran en la primer mitad de la mediana estándar, notándose que los valores menores se encuentran en las fibras del tallo.

Comparación con valores bibliográficos

Se realizó una búsqueda bibliográfica de las características químicas del cáñamo para comparar con resultados obtenidos de los componentes principales como lignina, celulosa y hemicelulosa (ver tabla 4).

Muestra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Manosalva, et al. (2020).	50,3	27,8	12,8
Kozłowski, et al. (2004).	57 – 73	—	9 – 13
Bismarck, et al. (2006).	70 – 74	17,9 – 22,4	8

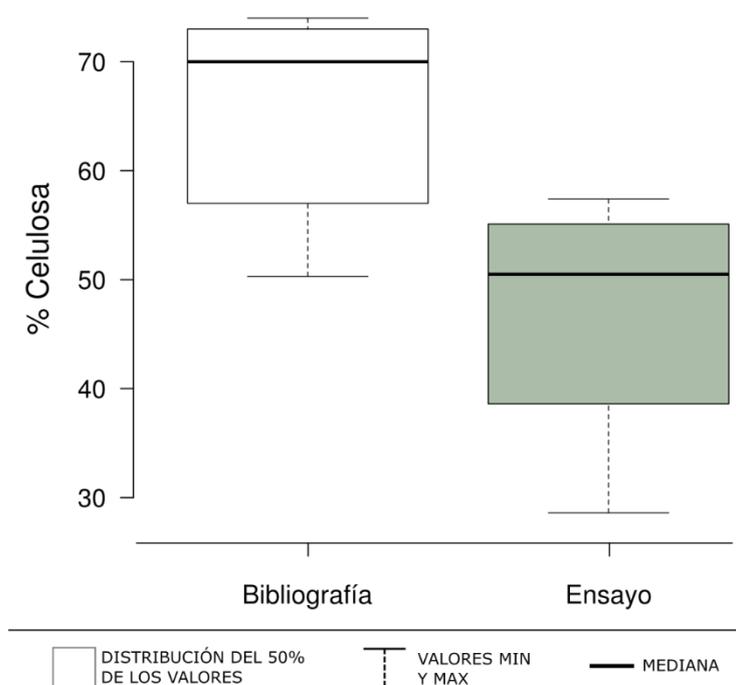
Tabla 4: Composición química de fibra de cáñamo industrial en bibliografía

Si bien la composición de tallos y fibras se correlaciona con parámetros como la edad de las plantas y las características del sitio de crecimiento y su método de cultivo, los resultados obtenidos son semejantes a los rangos encontrados como vemos a continuación.

Muestra	% Celulosa			% Hemicelulosa			% Lignina		
	Valor Mín	Valor Máx	Mediana	Valor Mín	Valor Máx	Mediana	Valor Mín	Valor Máx	Mediana
Bibliografía	50,3	74	70	27,8	17,9	22,4	8	13	10,9
Nacionales	28,6	57,4	50,50	13,4	36,7	25,05	9,9	14,9	10,75

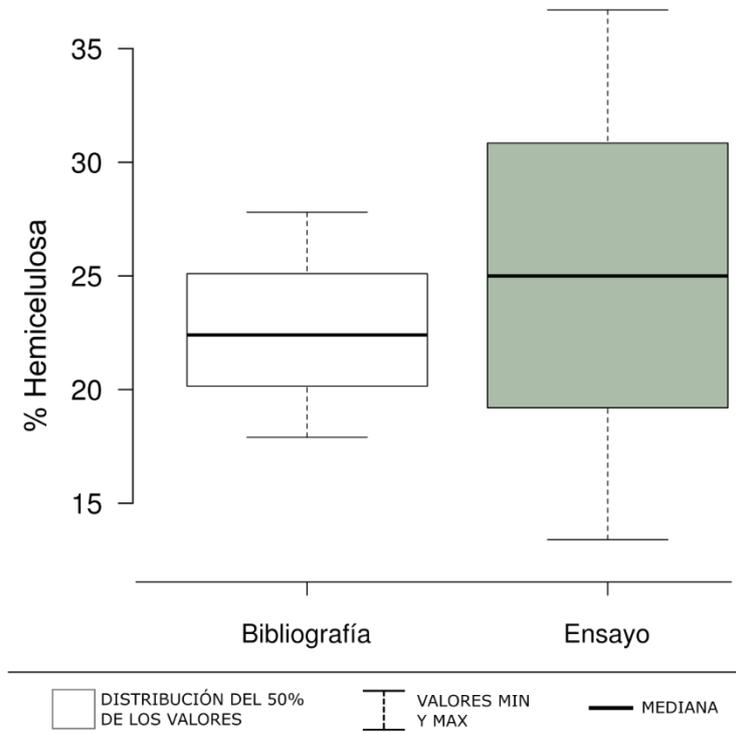
Tabla 5: Comparación entre datos de estudio y bibliografía

Mostraremos la información de la tabla 5 en un Diagrama de Caja³¹, comparando de forma visual los resultados obtenidos en nuestros análisis.

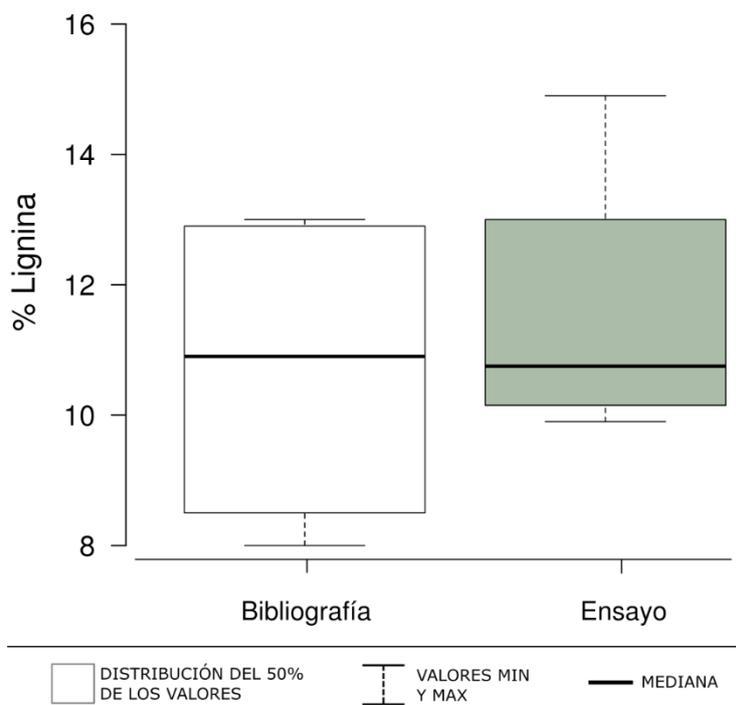


Esquema 5: Diagrama de cajas comparativo: % Celulosa

³¹ Este tipo de diagrama usado ampliamente en estadística se construye a través del análisis de los cuartiles de los datos usados, de forma de que el 50% de los valores queden dentro de una caja, delimitada por el primer y tercer cuartil. A su vez, se representa la mediana (que corresponde al segundo cuartil) como una línea recta que corta a la caja en dos partes.



Esquema 6: Diagrama de cajas comparativo: % Hemicelulosa



Esquema 7: Diagrama de cajas comparativo: % Lignina

Conclusiones de la caracterización del residuo y comparación.

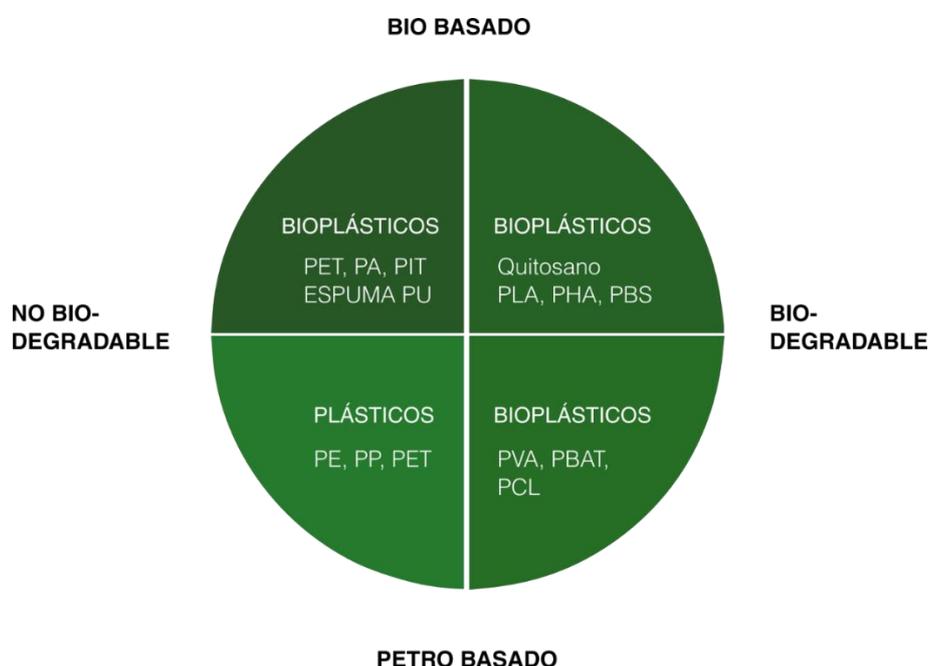
- De los ensayos realizados y su comparación con los datos bibliográficos consultados, observamos que nuestro material tiene similares porcentajes de lignina, comparados con el cáñamo industrial y significativamente menores al promedio de los valores de biomasa lignocelulósica, como se muestra en el Capítulo 1. Esto puede ser beneficioso en procesos donde se requiere deslignificación, como por ejemplo, la transformación de este material en pasta para papel (Campos, A. R., 2014). Si bien nuestras fibras tienen un menor contenido de celulosa comparado con fibras textiles, se encuentra dentro de los rangos estándar de materiales lignocelulósicos, otro factor que lo hace atractivo para ser transformado con este mismo fin.
- Respecto a los valores del tenor de hemicelulosa de los ensayos locales, resultan ser mayores a los datos bibliográficos, lo que podría ser interesante, considerando que es un polisacárido del que pueden obtenerse diversos insumos para la industria (Luévanos-Escareño et al., 2014). A su vez, se puede apreciar un mayor rango de valores dentro de éstos, incluso comparándolos con los valores estándar de materiales lignocelulósicos.
- La eliminación de polímeros no celulósicos (lignina) durante el enriado de campo da como resultado una menor coherencia entre las fibras y por lo tanto, resulta en propiedades mecánicas más bajas (Ming, L. et al., 2015). Con métodos más económicos, podría utilizarse el material sin deslignificar como refuerzo o carga, tanto para materiales biocompuestos, ya que únicamente se requeriría de un proceso de enriado para la separación de la fibra de la sección leñosa, sin modificaciones en la lignina, pero si genera una disolución de la pectina, componente que puede ser recuperado y valorizado.

2. Experimentación

Introducción

En base a los resultados obtenidos en nuestra caracterización, donde concluimos que el residuo de cáñamo puede ser una materia prima apta para el uso como carga o refuerzo de materiales compuestos, decidimos experimentar en esta etapa con membranas desarrolladas (films) por docentes del Centro de Investigaciones Nucleares, de la Facultad de Ciencias³². Dichas membranas fueron usadas como soportes (matriz) para la incorporación de nuestra materia prima.

Para prepararlas se utilizó una formulación basada en una emulsión agua en aceite (w/o)³³, seguida de entrecruzamiento con alcohol polivinílico, un polímero sintético biodegradable.



Esquema 8: Origen y grado de biodegradabilidad de algunos polímeros

Estas técnicas usan quitosano, el cual es un biopolímero biodegradable, obtenido por una desacetilación química de la quitina³⁴.

³² Ver formulación en “Desarrollo de membranas cargadas”, en Anexos 3 y 4.

³³ W/O (del inglés Water & Oil) es un tipo de emulsión donde un líquido acuoso o de carácter hidrófilo queda separado en gotas muy pequeñas, suspendidas en otro líquido, de carácter lipófilo. Fuente: Emulsiones 104: ¿Cómo saber si una emulsión es O/W o W/O? (n.d.). <http://www.diariodeformulacion.cl/emulsiones-water-oil/>

³⁴ Principal componente del exoesqueleto de crustáceos e insectos.

Teniendo en cuenta el origen de los principales materiales podemos decir que proponemos el desarrollo de un material a partir de una matriz parcialmente bio-basada con propiedades biodegradables utilizando una carga de origen natural.

Objetivo

Desarrollar un material biocompuesto con una matriz basada en Quitosano y PVA, cargada con residuos de cultivos de cáñamo medicinal.

Metodología

Para el desarrollo del material y su evaluación se siguieron los siguientes pasos:

- Se seleccionó la matriz a utilizar y se puso a punto su formulación para esta aplicación (proceso realizado por Facultad de Ciencias).
- Se definieron las variables a analizar y los ensayos a realizar junto a Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias.
- Se preparó el material de carga mediante procesos de molienda y tamizado.
- Se desarrollaron las muestras de membranas cargadas y sin carga.
- Se realizaron los ensayos definidos: absorción de humedad, tensión, TGA y DSC y observaciones por microscopía óptica.
- Se observaron y analizaron la relación de las variables mediante los resultados de los ensayos realizados y tablas de discusión.
- En base a los resultados obtenidos planteamos propuestas de posibles usos.

Variables

Observamos como se comportaron las muestras en función del tamaño de partícula y del porcentaje de carga en matriz³⁵.

Muestras

Se definen según cada experiencia. Ver Experiencia 1 y Experiencia 2 en las siguientes páginas.

Ensayos

Los ensayos fueron sugeridos por profesionales de Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería de UDELAR quienes colaboraron en la etapa de experimentación³⁶. Exceptuando TGA y DSC, los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería, bajo las normas ASTM.

³⁵ Se mide como peso/volumen, relacionando el peso de la carga con el volumen inicial de la matriz (líquida, sin carga).

³⁶ Ver desarrollo de los ensayos realizados y sus resultados en los Anexos 3 y 4.

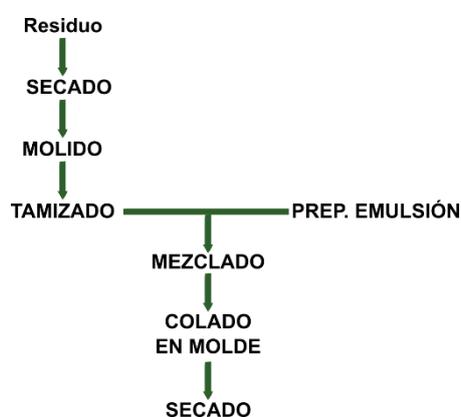
Experiencia 1

La primera experiencia consistió en la realización de tres muestras, utilizando la matriz basada en Quitosano y PVA, con una carga de material del 20 % en una relación peso/volumen, más una muestra donde no se agregó material de carga.

Para profundizar en el proceso realizado se recomienda consultar la sección Anexos 3.

Denominación	Granulometría (μm)	Carga (p/v)	Matriz
Muestra 45	45	20 %	Quitosano - PVA
Muestra 75	75	20 %	Quitosano - PVA
Muestra 300	300	20 %	Quitosano - PVA
Blanca	---	---	Quitosano - PVA

Tabla 6: Denominaciones y variables en las muestras de la Experiencia 1



Esquema 9: Proceso realizado en la Experiencia 1
Ver información en Anexo 3.

Resultados

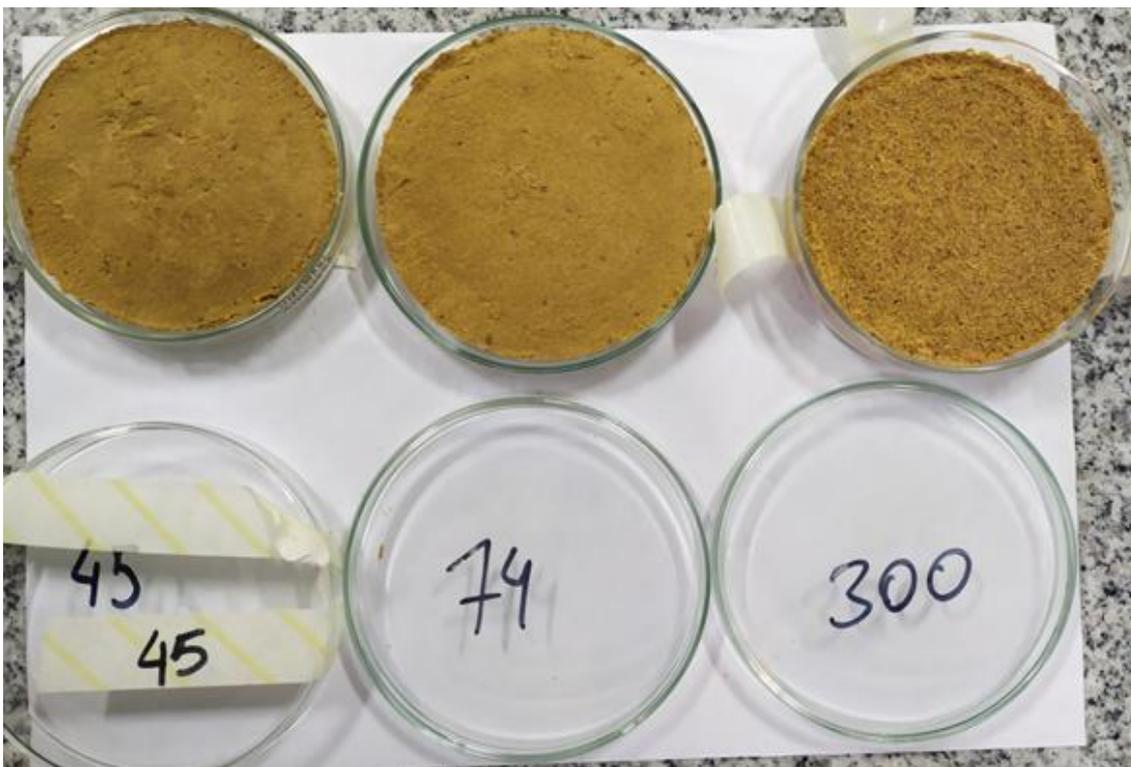
Se obtuvieron tres membranas cargadas de aproximadamente 90 mm de diámetro y un espesor de 9 mm y una muestra Blanca del mismo diámetro y un espesor de 1 mm (ver imagen 17).

Los volúmenes iniciales redujeron luego del proceso de secado en un 6 % para la muestra 300, un 16 % para la 75 y 42 % para la 45, sin datos para la muestra Blanca.

El desmolde de las membranas resultó sencillo por el uso de Parafilm³⁷ como recubrimiento de las placas de Petri.

³⁷ Película flexible semitransparente compuesta de ceras y poliolefinas, usada en laboratorios como barrera contra la humedad, protección de instrumentos o desmoldante.

Las membranas 45 y 75 se perciben rígidas al tacto, mientras que la muestra 300 resultó un poco más corchosa y flexible que las otras.



**Imagen 17: Membranas obtenidas en la Experiencia 1
Matriz de Quitosano y PVA con carga 20 % en relación p/v.**

Al cortar la membrana 300 se observó que presentaba dos zonas totalmente diferenciadas. La primera zona correspondiente a la cara superior del material, con un espesor que ronda los 3 mm, expuesta al calor del horno, de un color más oscuro, mayor dureza y compactación. A medida que nos alejamos de esta primera zona, las partículas comienzan a separarse con facilidad, pues prácticamente no existe adherencia entre ellas.



Imagen 18: Sección de la muestra 300

Experiencia 2

A partir de la primera experiencia, se decidió disminuir el porcentaje de carga en matriz para las granulometrías gruesas, pasando del 20 % al 15 % con el fin de mejorar la adherencia entre las partículas.

Se realizaron siete membranas de material, seis de ellas cargadas y una en blanco. El porcentaje de carga y las granulometrías usadas para cada una se detalla en la siguiente tabla.

Denominación	Granulometría (µm)	Carga (p/v)	Matriz
Muestra 45	45	20 %	Quitosano – PVA
Muestra 75	75	20 %	Quitosano – PVA
Muestra 300	300	15 %	Quitosano – PVA
Muestra 600	600	15 %	Quitosano – PVA
Fina	45 – 75 – 150	20 %	Quitosano – PVA
Gruesa	300 – 600	15 %	Quitosano – PVA
Blanca	---	---	Quitosano – PVA

Tabla 7: Denominaciones y variables en las muestras de la Experiencia 2

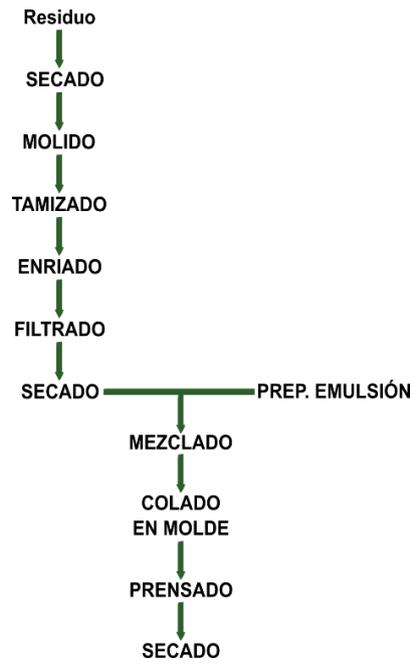
Se agregó un proceso de prensado para eliminar el aire contenido dentro de la membrana cargada con el residuo de cáñamo.

Se decidió cambiar los moldes por otros de mayor tamaño, que permitieran obtener muestras de material más grandes, para realizar los ensayos de tensión y tracción.

Se construyeron moldes en hierro buscando que resistan un proceso de prensado más industrializado. Fueron fabricados con un sistema de molde-contramolde.

Se agregó dos muestras denominadas Fina y Gruesa, con el fin de observar el comportamiento de sus propiedades y justificar si es necesaria una separación granulométrica tan diferenciada, pues este proceso, vuelve más costoso y menos eficiente un posible flujo productivo.

Los pasos para realizar el desarrollo del material en esta etapa se muestran en el siguiente esquema. Recomendamos visitar el Anexo 4 para profundizar en ellos.



Esquema 10: Proceso realizado en la Experiencia 2

Resultados



Imagen 19: Resultados obtenidos
 De izquierda a derecha arriba: Gruesa, Blanca, 300. Abajo: 600, Fina, 45, 75.

- Para el caso de las membranas cargadas se obtuvieron espesores de entre 4 y 5 mm, partiendo de un espesor de 7 mm previo al secado.
- La muestra Blanca quedó completamente flexible, igual a la Experiencia 1.
- La muestra 300 mantuvo cierta flexibilidad.
- Las muestras con partículas menores a 150 μm resultaron rígidas y compactas.
- La muestra Gruesa se observa porosa, igual que la muestra 300 en la Experiencia 1.
- Si bien el objetivo del papel era permitir el desmolde, éste no se despegó del material y permaneció adherido, aportando estructura y una terminación lisa.
- Se generó una reacción química entre el molde de hierro y la matriz ácida del material, generando un teñido amarronado en el mismo, como vemos en la imagen 20.
- No se perciben modificaciones en las membranas cargadas con partículas mayores a 150 μm , a pesar de haber reducido el porcentaje de carga en matriz.
- Todas las membranas cargadas presentan burbujas causadas por la saturación del PVA en la matriz.



Imagen 20: Medición del PH en muestra Blanca

Evaluación de muestras

Realizamos diferentes ensayos³⁸ para conocer cómo se comportan las muestras desarrolladas y evaluar la interacción carga-matriz. Esto nos permitió saber si efectivamente nos encontrábamos frente a un material biocompuesto.

Se realizó una evaluación de muestras para cada etapa de experimentación antes descrita, como se muestra en la siguiente tabla.

Ensayo	Experiencia 1	Experiencia 2
Microscopía óptica	X	-
Absorción de humedad	X	X
TGA - DSC	X	-
Tensión	-	X

Tabla 8: Ensayos realizados en cada experiencia

No fue posible realizar todos los ensayos en todas las muestras por inconvenientes relacionados con el material obtenido.

Microscopía óptica

La microscopía óptica es un procedimiento de investigación que utiliza un microscopio para obtener imágenes de estructuras que, a simple vista, resultan inapreciables para el ojo humano por ser demasiado pequeñas.

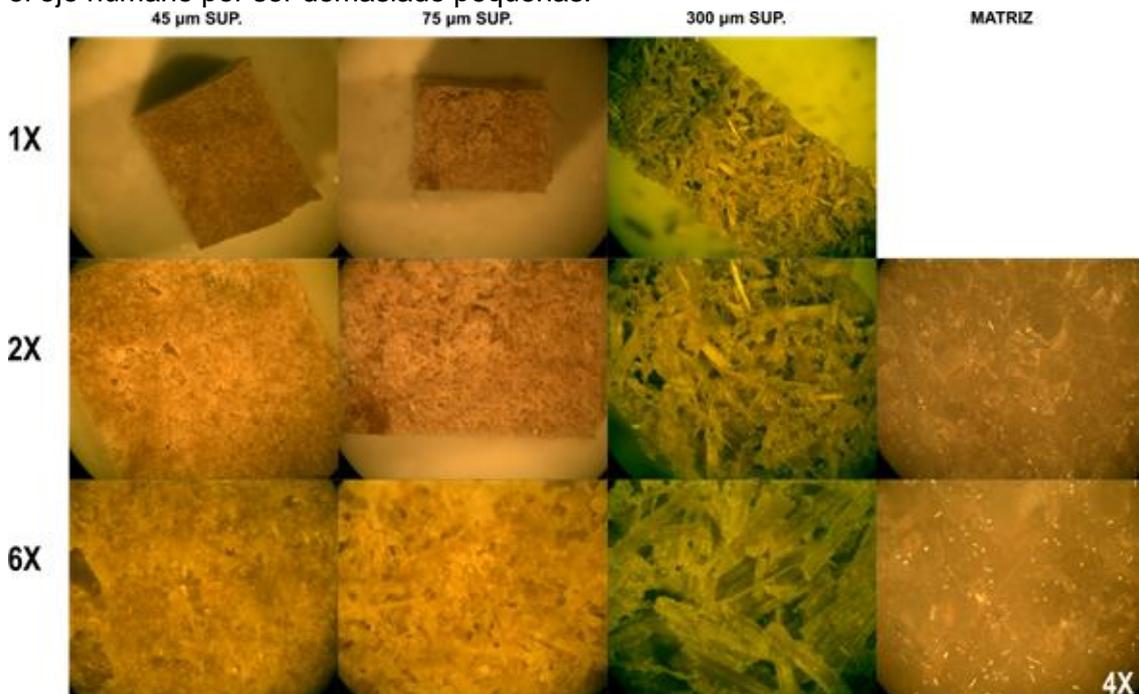


Imagen 21: Microscopía óptica: Cara superior

³⁸ Los ensayos realizados y sus procedimientos describen en profundidad en Anexo 3: Experiencia 1 y Anexo 4: Experiencia 2.

Absorción de humedad

El ensayo de absorción de humedad consiste en sumergir muestras de masa conocida en agua y retirarlas para medir su variación de masa en períodos de tiempo conocidos.



Imagen 22: Absorción de humedad
Muestras a las 24 hs de sumergidas. Detalle de la muestra 300 en agua.

TGA y DSC

El análisis termogravimétrico (TGA) se usa para caracterizar las propiedades físicas y químicas de los materiales, en función de la temperatura en una atmósfera controlada. El análisis de estabilidad térmica (DSC) es un ensayo que permite determinar la energía asociada a la descomposición de un material o mezcla. Se conoce con el nombre de calorimetría diferencial.

Los análisis de termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido se realizan en simultáneo en un mismo equipo. La primera técnica permite determinar el rango de temperaturas en que ocurre una pérdida de masa. El flujo de calor registrado en la calorimetría diferencial muestra si se produjo una reacción exotérmica o endotérmica. El análisis de los resultados en combinación con otras técnicas de estudio diferentes podría explicar si las pérdidas de masa en determinados rangos de temperatura están asociados a la pérdida de celulosa, hemicelulosa o lignina.

Tensión

El ensayo de tensión provee información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales, mediante tensiones de tracción uniaxiales. Esta información es útil para comparar materiales entre sí y desarrollar nuevos materiales.

Desafortunadamente no se pudo realizar el ensayo, porque las muestras se rompían antes de comenzar, al momento de sujetarlas al equipo, como se observa en la siguiente imagen.



Imagen 23: Probeta en ensayo de Tensión

Resultado de los ensayos

Muestras	Microscopia óptica	Absorción de humedad	TGA/DSC
Blanca		Punto crítico a las 24 hs. Mayor absorción de agua que el resto de las muestras.	
45	Burbujas de gran tamaño. Membrana de mayor compactación.	Punto crítico a las 24 hs. No pierde cohesión.	Alta estabilidad térmica.
75	Se observan espacios vacíos entre partículas, sin ser rellenados por la matriz.	Punto crítico a las 24 hs. Mantiene su forma durante todo el período de ensayo. No pierde cohesión.	Alta estabilidad térmica.
300	Partículas entrelazadas. Se observa recubrimiento de las partículas por la matriz, pero no hay unión.	Separación de partículas desde su colocación agua. Punto crítico a las 24 hs.	Baja estabilidad térmica.

Tabla 9: Resultados de los ensayos de la Experiencia 1

Muestras	Absorción de humedad	Tensión
Blanca	Punto crítico a las 24 hs. Mayor absorción de agua que el resto de las muestras.	Se corta la probeta, pero la máquina no llega a medir la rotura.
45	Punto crítico a las 24 hs.	Se corta la probeta, pero la máquina no llega a medir la rotura.
75	Punto crítico a las 24 hs. Mejora su comportamiento por el prensado.	Se corta la probeta, pero la máquina no llega a medir la rotura.
300	Separación de partículas desde su colocación agua. Punto crítico 24 hs.	No se logró cortar las probetas correctamente.
600	Punto crítico a las 24 hs.	No se logró cortar las probetas correctamente.
Fina	Punto crítico a las 24 hs.	Se corta la probeta, pero la máquina no llega a medir la rotura.
Gruesa	Punto crítico a las 24 hs.	No se logró cortar las probetas correctamente.

Tabla 10: Resultados de los ensayos de la Experiencia 2

Características sensoriales del material obtenido

Muestra	Color	Poroso	Compacto	Flexible	Rígido	Corchoso	Duro
45	Ocre		X		X		X
75	Ocre		X		X		X
300	Ocre	X			X	X	
600	Ocre	X		X		X	
Fina	Ocre		X		X		X
Gruesa	Ocre	X		X		X	

Tabla 11: Aspecto del material obtenido

Conclusiones de la experimentación

- Al enriar el material luego del proceso de molienda surge la problemática de la separación de la fibra de la sección leñosa, volviendo el material aún más heterogéneo.
- El prensado mejora el comportamiento de las membranas al someterlas al ensayo de absorción de humedad.
- Las partículas de PVA no disueltas por saturación generan espacios vacíos luego del secado, disminuyendo la resistencia del material al quiebre.
- La viscosidad obtenida luego de agregar la carga no es adecuada para el prensado, pues la membrana es demasiado líquida y fluye por la holgura existente entre el molde y la matriz. Este problema nos obligó a esperar que la membrana solidificara hasta el punto de poder ser prensada.
- Según los resultados de los ensayos podemos afirmar que no se logró generar un material biocompuesto al no existir una unión resistente entre las partículas y la matriz, principalmente en las granulometrías mayores a 300 μm .
- En caso de continuar utilizando la matriz de Quitosano y PVA, sería conveniente considerar el uso de moldes de acero inoxidable 316 L para disminuir la reacción producida entre la matriz y el molde.

3. Alternativa de valorización: Biorrefinería

La propuesta de valorización del residuo de cáñamo con fines medicinales y sus posibles aplicaciones, toma como punto de partida el aprovechamiento integral del mismo, basándonos en principios de bioeconomía, teniendo en cuenta el momento histórico que se vive y la necesidad de utilizar eficientemente cada recurso existente de la forma más respetuosa con el planeta. Consideramos que un esquema de producción de biorrefinería cumpliría con nuestro propósito y sería el método óptimo de aprovechamiento de un recurso natural, en este caso, un residuo.

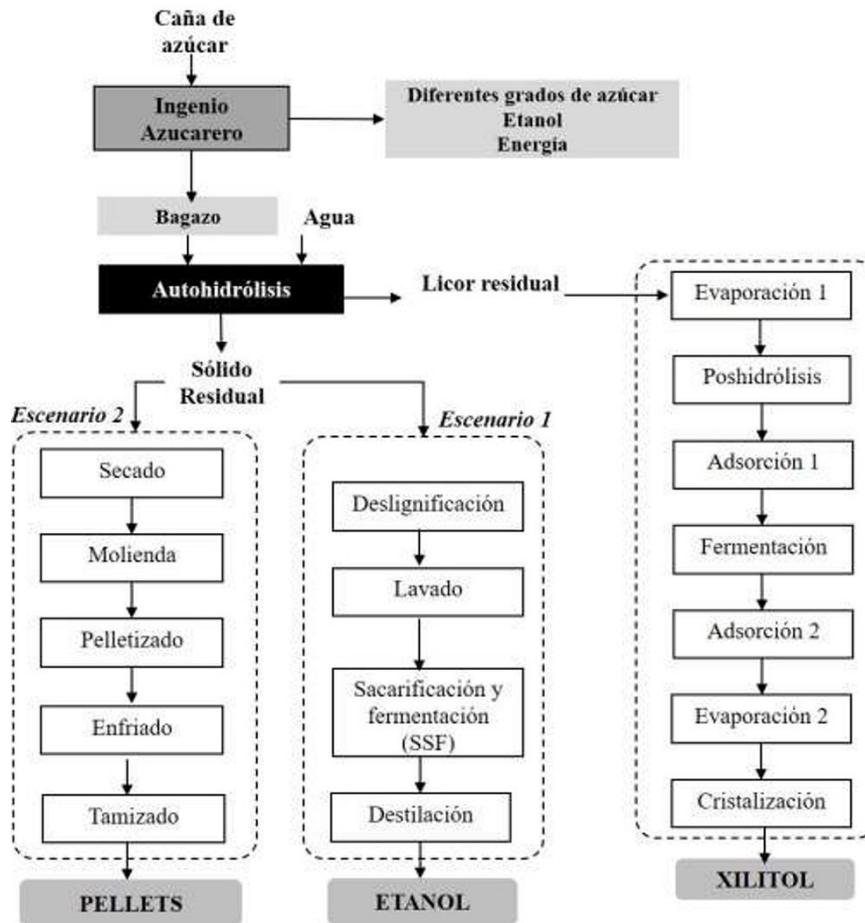
Creemos que esta lógica es parte de un nuevo paradigma que rompe con un esquema lineal e implementa un modelo de producción circular, donde la transdisciplinariedad es fundamental por el grado de complejidad que implica este tipo de sistemas.

Hemos tomado como referencia un trabajo que propone diferentes esquemas de valorización de residuos lignocelulósicos dentro del concepto de biorrefinería, con el objetivo de trasladar uno de esos procesos, para el aprovechamiento de nuestro residuo. Nicolás Clauser, en su tesis doctoral³⁹, plantea un sistema, adaptado a las necesidades de su región, donde el valor no radica exclusivamente en un único producto final, sino que considera que en cada proceso surgen recursos que pueden ser valorizados en forma de nuevos productos.

En Uruguay contamos con una biorrefinería ya instalada (ALUR), además existe una extensa bibliografía académica referente a las posibilidades de utilización de esta planta industrial. Por este motivo, seleccionamos uno de los esquemas propuestos, centrados en la valorización del bagazo de caña de azúcar (ver esquema 11) proponiendo tres escenarios posibles para una biorrefinería de pequeña escala.

Se considera producción a pequeña escala aquella en la que es factible obtener productos de alto valor agregado con una capacidad de producción relativamente baja. Posee ventajas respecto a las grandes escalas como ser: menores costos de transporte (debido a que se aprovechan los residuos locales), menores riesgos de inversión, mayores oportunidades de investigación y desarrollo, entre otras. Además, existe la posibilidad de ocupación laboral en áreas rurales, lo que significa un beneficio adicional.

³⁹ Clauser, N. M. (2018). *Estudio técnico-económico de la Biorrefinería de los residuos de industrialización primaria de la madera y agroindustriales*. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones.



Esquema 11: Diagrama simplificado de los procesos involucrados para los tres escenarios presentados. (Clauser, 2019)

Como resultado, remarca la necesidad de un aprovechamiento de todas las fracciones posibles del material y destaca por su rentabilidad económica la producción de Xilitol a partir de la valorización de la hemicelulosa y la generación de pellets a partir de la fracción sólida restante, antes que la producción de etanol.

Aunque Clauser propone que su esquema es óptimo para biorrefinerías de escala pequeña (alrededor de 15.000 T), en Uruguay la generación de residuo de cáñamo con fines medicinales a cielo abierto, ronda entre 2.000 y 4.000 T anuales. Está previsto un aumento en la elaboración de productos de cáñamo medicinal, que se verá reflejado en un incremento del volumen de residuos. Se debe investigar si es posible realizar la incorporación de otros materiales lignocelulósicos para realizar un esquema de biorrefinería con un mix de residuos.

Desde el punto de vista de equipamientos, el autor propone la posibilidad de incorporar los equipos utilizados en los procesos actuales de evaporación, fermentación y cristalización de la producción de azúcar, en los procesos de extracción de químicos de alto valor presentes en el bagazo de caña de azúcar.

Como punto de partida, comparamos la caracterización química de los elementos lignocelulósicos de cada uno de los materiales residuales, como se muestra en la siguiente tabla.

Componente	Residuos agroindustriales (%)	
	Bagazo	Cáñamo c/fin Medicinal ⁴⁰
Celulosa	43,1	28,6 – 50,5
Hemicelulosa	27,2	29,2 – 36,7
Lignina	21,3	9,9 – 10,4
Extractivos	4,6	6,15 – 7,22
Cenizas	1,5	2,8 – 3,5

Tabla 12: Caracterización química comparada del bagazo y el cáñamo medicinal

Podemos ver que los porcentajes de hemicelulosas encontrados en los ensayos realizados en el residuo de cáñamo, son similares a los del bagazo, y que los valores de lignina son significativamente inferiores, datos importantes para la valorización y los procesos presentados.

Selección de productos

Luego de una evaluación considerando los requerimientos energéticos de los procesos, el valor de comercialización de los productos y el intento por aprovechar todo el material lignocelulósico con una implementación en una pequeña escala de producción, Clauser tomó la sección hemicelulósica del material como fracción a valorizar, de la que pueden ser extraídos y transformados principalmente los compuestos xilanos.

Composición de Hemicelulosa	Bagazo (%)
Glucanos	-
Xilanos	23,8
Arabinanos	1,7
Mananos	-
Galactanos	-
Acetilos	1,7

Tabla 13: Compuestos de la hemicelulosa del bagazo (Clauser, 2019)

No contamos con información de la composición de las hemicelulosas presentes en nuestro residuo, siendo necesario realizar este estudio en caso de considerar la adaptación de los procesos del bagazo al residuo de cáñamo con fin medicinal.

⁴⁰ Material entero, sin procesar.

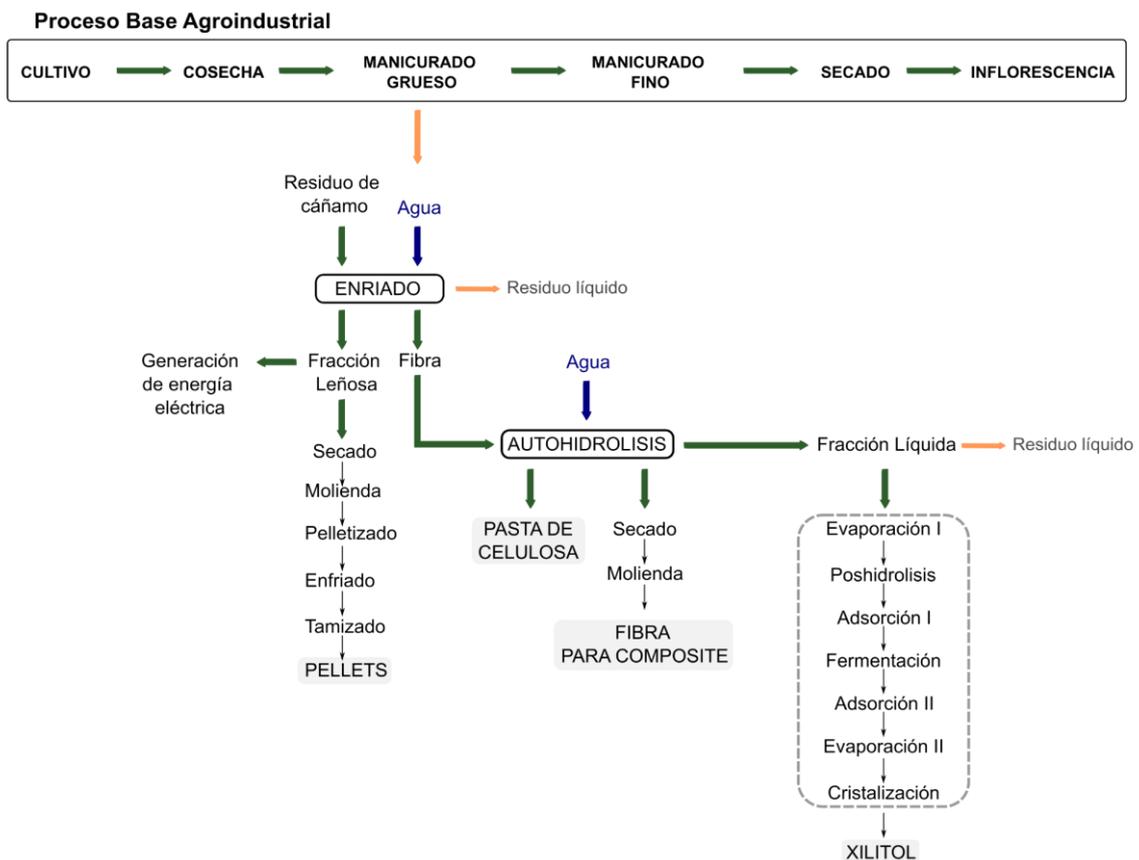
Diseño de Procesos

Para el diseño del proceso de producción, el autor tuvo en cuenta tanto los factores técnicos, como económicos. Dentro de los factores técnicos consideró las operaciones necesarias, las reacciones químicas y procesos físicos involucrados y las actividades que conforman el proceso de producción de los distintos productos. En el aspecto económico, estimó los costos de producción, la inversión y el tiempo necesario para recuperarla.

Hemos tomado como punto de partida su propuesta (esquema 11) para adaptarla a las características de nuestro material, el cual presenta una marcada diferencia entre su sección fibrosa y leñosa, principalmente por sus características físicas que dificultan el aprovechamiento integral del mismo como biomaterial.

Por lo que incorporamos al proceso una primera etapa de enriado, donde el material leñoso es separado del fibroso por disolución en agua de la pectina.

La pectina es un gelificante utilizado en gastronomía, por lo que sería conveniente evaluar su extracción para su posterior valorización.



Esquema 12: Propuesta básica de aprovechamiento del residuo

Efluentes

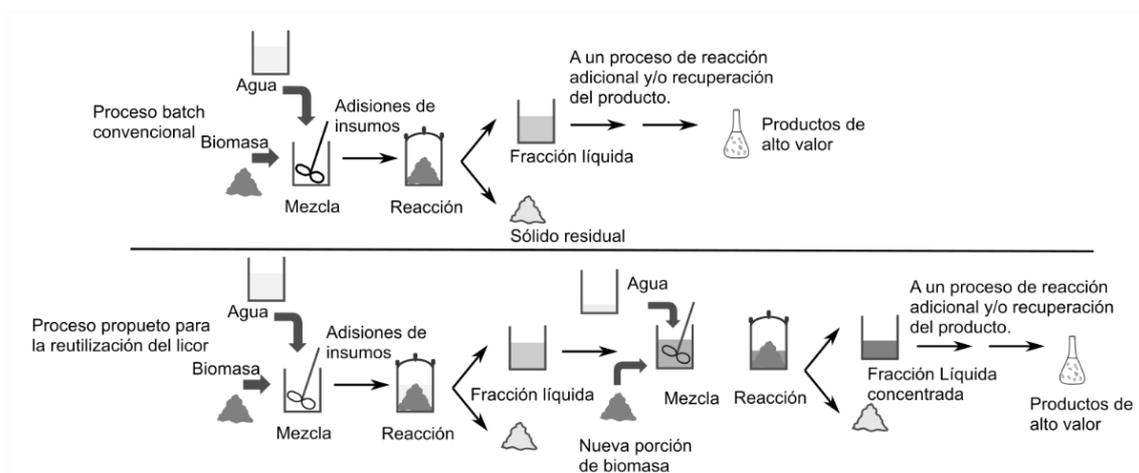
Los efluentes generados en el proceso pueden ser compuestos volátiles, líquidos y sólidos, pero según indica el trabajo de referencia citado, ninguno de ellos reúne los requisitos para ser considerados peligrosos (inflamables, tóxicos, corrosivos, sustancias infecciosas, entre otros).

Los pretratamientos ácidos y alcalinos generan corrientes ácidas y alcalinas, este tipo de corrientes se pueden tratar de manera similar al tratamiento de las industrias papeleras.

Recirculación de residuos líquidos

Uno de los desafíos a los que se enfrentan las nuevas biorrefinerías es producir productos básicos y químicos valiosos con procesos eficientes y rentables. Además de la utilización de tecnologías ecológicas y de bajo impacto ambiental.

La reutilización de fluidos mediante la reincorporación a los pretratamientos (enriado y autohidrólisis) es un recurso planteado por Clauser, con el que se podría reducir costos energéticos por el aprovechamiento del calor disponible en la fracción líquida. Se obtendría un líquido más concentrado para su posterior valorización, además de la utilización eficiente de un recurso tan importante como es el agua.

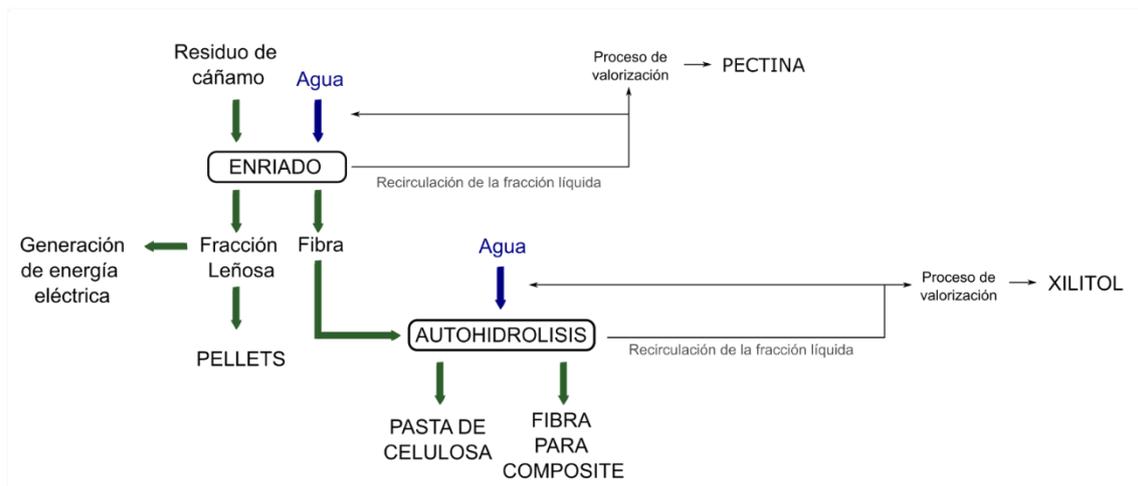


Esquema 13: Reúso de la fracción líquida en el pretratamiento de la biomasa (Clauser, 2019)

En el caso de un proceso de hidrólisis, a medida que aumenta el número de reutilizaciones, el licor se concentrará cada vez más en azúcares hidrolizados, en sus productos de degradación y también en otros compuestos (por ejemplo, compuestos orgánicos solubles, sales).

Para poder aplicar este proceso, su autor remarca la importancia de tener en cuenta que la reutilización puede aplicarse al tratamiento previo, siempre que el producto generado por la hidrólisis ácida no se degrade a otro tipo de producto no deseado, ya que se disminuiría la cantidad producto generado por la hidrólisis en su posterior conversión.

A continuación, planteamos para nuestro trabajo los puntos del proceso donde podría utilizarse el concepto de recirculación.



Esquema 14: Recirculación de líquidos para el residuo de cáñamo

En el líquido resultante del enriado, se encuentra solubilizada la pectina, la cual podría ser valorizada posteriormente.

El otro punto importante para la recirculación del licor es el momento posterior a la autohidrólisis, cuando la fracción sólida se prensa para ser separada de la fracción líquida.

Procesos

Enriado

De forma tradicional es llamado enriado en la elaboración de fibras textiles a partir de cáñamo, el dejar el material en el campo para que, por acción enzimática, se disuelvan los componentes que mantienen unidas la sección leñosa y corteza y fibra. Es parte de un proceso anterior a la separación de fibra de la sección leñosa por acción mecánica (decorticado) y es esencial para la reducción de daño de la fibra.

El enriado en campo sucede de forma natural por la acción de humedad, bacterias y hongos que degradan ciertos componentes como la pectina, también de forma no deseada, puede suceder lo mismo con la lignina y celulosa.

Según un trabajo realizado por Ming L. (2015), si el proceso de enriado no es controlado o se extiende por mucho tiempo, lleva a un deterioro y pérdida de calidad del material. En caso de ser necesario un proceso de enriado para su posterior uso, el enriado de campo tradicional puede no ser el óptimo pretratamiento si se quiere obtener fibras fuertes.

Por este motivo, proponemos un enriado controlado para el aprovechamiento de la sección que se quiere valorizar, en este caso la hemicelulosa, para transformarla posteriormente en Xilitol.

Existen métodos enzimáticos, con microbios seleccionados, o productos químicos que pueden ser utilizados en procesos de fermentación tanto en presencia de agua (fermentación sumergida) como en ausencia de ésta, pero dentro de un entorno húmedo (fermentación sólida).

Ambos procesos han sido muy desarrollados, conociendo que el método de fermentación sólida es más complejo por el grado de control que debe tenerse en el ambiente generado, para que el material no se degrade de forma parcial. Por otra parte, implica un gran ahorro en la utilización de agua.

Autohidrólisis

Según el autor la reactividad de la hemicelulosa permite que pueda ser eliminada primero de la estructura lignocelulósica mediante procesos como autohidrólisis, explosión de vapor o pretratamiento ácido.

De estos tres procesos seleccionó la autohidrólisis, por ser un tratamiento que se realiza en condiciones menos severas que la hidrólisis ácida y es usado generalmente en residuos no madereros que contienen menos lignina.

Se trata de un tratamiento en un medio acuoso a elevadas temperaturas en un reactor presurizado. Se genera ácido acético que actúa como catalizador de la hidrólisis.

Es un proceso que no requiere insumos químicos, presenta menores problemas de corrosión en equipos, lo que lo vuelve más amigable, aunque si requiere altas temperaturas.

Producción de Xilitol

El esquema planteado para la producción de xilitol consta de las siguientes etapas: autohidrólisis, concentración del licor, poshidrólisis ácida, eliminación de inhibidores por adsorción⁴¹, fermentación de xilosa a xilitol y recuperación de xilitol por cristalización.

Luego de la autohidrólisis, se separa el licor residual que contiene mayormente xilo-oligómeros y xilosa, del sólido mediante un sistema de filtros prensa.

Posteriormente se concentra en un sistema evaporador de película descendente para ser bombeado a un reactor presurizado, donde se realiza la poshidrólisis que convierte los xilo-oligómeros en xilosa.

La levadura llamada *Candida Tropicalis* es el inóculo utilizado para fermentar la xilosa y obtener xilitol. Éstas se preparan en un proceso de fermentación paralelo para luego ser inoculadas en el licor.

Luego de la fermentación, las células de levadura se recuperan mediante un filtro de membrana. Es necesario quitar las impurezas y los nutrientes mediante columnas de carbón activo para eliminar el color y el olor.

Posterior a la detoxificación se realiza una concentración del licor (utilizando un evaporador de película descendente) y una cristalización⁴² del xilitol.

⁴¹ La adsorción es un proceso donde un sólido, en este caso carbón activo, se utiliza para quitar una sustancia soluble del agua. El carbón activo posee una superficie interna muy grande (entre 500 y 1500 m²/g), característica que le proporciona una adsorción ideal. Extraído de: <https://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm>

⁴² La cristalización es un procedimiento de purificación usado en química por el cual se produce la formación de un sólido cristalino, a partir de un gas, un líquido o incluso, una disolución. Extraído de: <https://quimica.laguia2000.com/general/cristalizacion>

Producción de pellets

La producción de pellets es tecnológicamente más simple que el proceso de producción de xilitol.

Proponemos realizar el pelletizado a partir de la fracción sólida leñosa, por ser el residuo sólido de mayor volumen, pero de menor posibilidad de valorización por sus características físicas (fibras secundarias cortas), que la fibra de líber⁴³.

El proceso para la producción de Pellets propuesto por Clauser comprende el secado del sólido residual, la molienda para reducir el tamaño de las partículas, el pelletizado y por último un enfriamiento (solidificación y fortalecimiento de los pellets) para proporcionar resistencia y durabilidad a los gránulos.

Finalmente, un tamizado a través de un tamiz vibrante permite separar el material fino, que se recupera introduciéndose nuevamente en el proceso de pelletizado.

Después del tamizado, los pellets se envasan.

En el proceso de secado, el contenido de humedad final debe ser aproximadamente del 15 %.

Esto supone un gran consumo de energía y es un punto importante de investigación, ya que la industria intenta minimizar los costos y mejorar la calidad energética.

Se utilizan tambores rotativos para el secado.

El tratamiento mecánico del pelletizado aumenta la temperatura a 100 °C debido a la fricción, reduciendo el contenido de humedad en los pellets a 5-8 %.

El enfriamiento se realiza con aire para solidificar la lignina, fortaleciendo así la estructura de los pellets.

Valorización de fibra

La fibra obtenida luego del proceso de autohidrólisis podría ser valorizada de varias maneras, nosotros proponemos la utilización como material de carga o como pasta de celulosa pretratada.

Pasta de celulosa química pretratada

Luego del proceso de autohidrólisis, la fracción de celulosa permanece en la sección sólida, obteniendo una pasta de celulosa pretratada que puede ser utilizada en la industria papelera para la generación de productos. Se conoce que esta fibra es de color claro blanquecino, lo que implicaría un proceso de blanqueamiento menor o incluso la posibilidad de la utilización del material con su coloración natural.

La incorporación de la pasta pretratada a los procesos de fabricación de papel implica una reducción de costos por: i) contar con un material que ya fue separado de su corteza ii) que ya sufrió un proceso parcial o completo de deslignificación iii) que puede no requerir de blanqueo, obteniendo un producto de aspecto natural por su color blanco crudo para utilizar como cartulina o cartón para embalaje.

⁴³ Fibra que se encuentra en la corteza o en el tallo del cáñamo. Ver Glosario.

Fibra para materiales biocompuestos

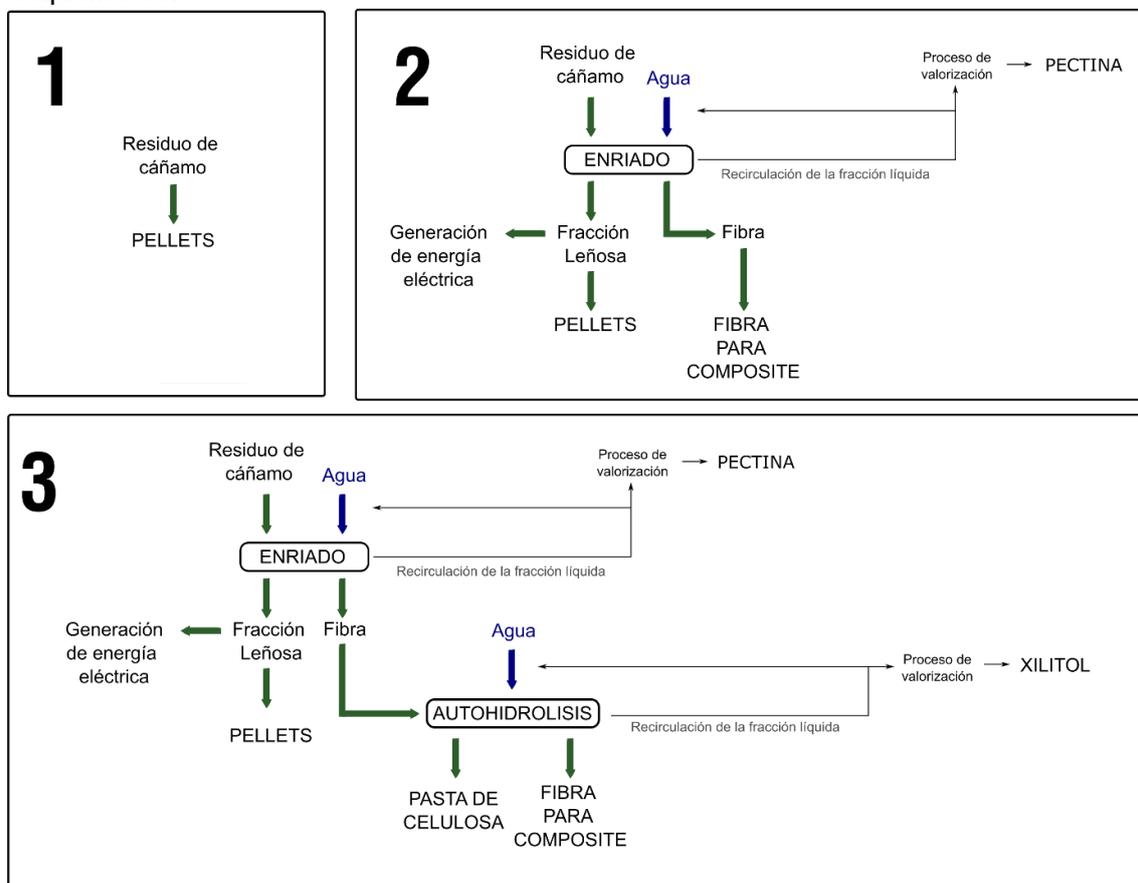
Si a la pasta resultante además se le seca, obtenemos una materia prima apta para ser utilizada como fibra de carga o refuerzo de materiales biocompuestos. Puede ser molida y tamizada para homogenizar su granulometría y aprovechar sus diferentes propiedades, como se experimentó en el capítulo 2 de este trabajo.

Implementación en etapas

La implementación del proyecto en etapas permite trabajar con menores volúmenes de material, comenzando desde procesos simples que no requieren grandes inversiones de capital. A medida que el cultivo se establezca y crezca en el país, puede pensarse también en una diversificación, agregando subproductos de mayor valor, surgidos de la misma materia prima.

Otro factor a tener en cuenta es el nivel de desarrollo tecnológico. Los procesos que implican biotecnología, como los procesos de fermentación, hidrólisis enzimáticas y producción de enzimas, siguen evolucionando y prometen ser menos costosos que los métodos tradicionales, aunque hoy en día, si bien se implementan en escalas industriales, siguen siendo complejos.

Planteamos la implementación productiva en tres etapas, como se muestra en el esquema 15.



Esquema 15: Implementación del proceso en etapas

ETAPA 1

En la primera etapa, se plantea la producción de pellets para estufas de alto rendimiento. A nivel tecnológico no existen dificultades y los equipos requeridos pueden adaptarse fácilmente a los volúmenes de material con los que se dispongan.

ETAPA 2

En este punto la producción comienza a diversificarse, incluyendo procesos más complejos como el enriado y la recirculación de líquidos. Se requiere de una evaluación técnica y económica para determinar el volumen de material necesario a partir del cual es conveniente aplicar estos procesos.

La recuperación (filtrado) de la pectina puede realizarse en la planta, pero su purificación, en un principio, podría tercerizarse a empresas que cuenten con las instalaciones necesarias, o directamente proponerlo como un subproducto a comercializar antes de la purificación.

ETAPA 3

Es la última etapa de implementación para el esquema propuesto. En este punto se agrega el proceso de Hidrólisis, es el de mayor requerimiento energético, el que utiliza más agua y el más costoso, pero también es el que genera los productos de mayor posibilidad de valorización. Por lo que es una etapa que debe estudiarse en profundidad.

En Uruguay, como hemos nombrado anteriormente en este trabajo, existe la planta de biorrefinería de ALUR. Según Clauser, los equipos presentes en este tipo de instalaciones podrían ser utilizados para la valorización del Xilitol a partir de la sección líquida originada en el proceso de Hidrólisis.

Conclusiones

- El residuo del cultivo de cáñamo medicinal a cielo abierto en nuestro país es generado en el proceso de manicurado grueso y suele desecharse en el campo. Para su aprovechamiento se debe mostrar a los productores la potencialidad del residuo y definir condiciones de acopio, para evitar la degradación de los componentes valorizables.
- Los análisis de laboratorio de las muestras de cáñamo medicinal revelaron que sus características lignocelulósicas son similares a las del cáñamo industrial y otros materiales lignocelulósicos, mostrando la potencialidad del residuo para ser aprovechado de forma integral como materia prima en un sistema de biorrefinería.
- Los procesos de biorrefinería fueron elegidos como alternativa para reincorporar el residuo a la cadena productiva, porque permite extraer, transformar y valorizar todos sus componentes y subproductos surgidos a partir de los licores, durante los procesos realizados, cumpliendo con el objetivo de maximizar el aprovechamiento y minimizar los residuos.
- Al separar la fibra de la sección leñosa por medio de un enriado se maximiza la valoración de la materia prima, por la diversificación de subproductos.
- Para el caso de la fibra, en un contexto de biorrefinería, la autohidrólisis permite aprovechar tanto sus propiedades estructurales como químicas.
- Estructuralmente, el residuo estudiado puede usarse como carga para el desarrollo de materiales compuestos o biocompuestos, también, en caso de la implementación de autohidrólisis, la pasta resultante puede incorporarse a los procesos de fabricación de papel como pasta de celulosa química.
- Químicamente, permite extraer productos de alto valor utilizados en la industria derivados de su composición (compuestos aromáticos, adhesivos, e incluso insumos para edulcorantes).
- Por sus bajos niveles de lignina puede ser deslignificada más fácilmente que otras biomasas, disminuyendo los costos productivos, generando grandes ahorros energéticos y disminuyendo el impacto ambiental de los tratamientos.
- Como resultado de las experimentaciones no logramos generar un material biocompuesto, por la falta de adhesión entre las partículas y la matriz. Se deberá continuar experimentando e investigando en este sentido, por ese motivo presentamos sugerencias a tener en cuenta.

Sugerencias

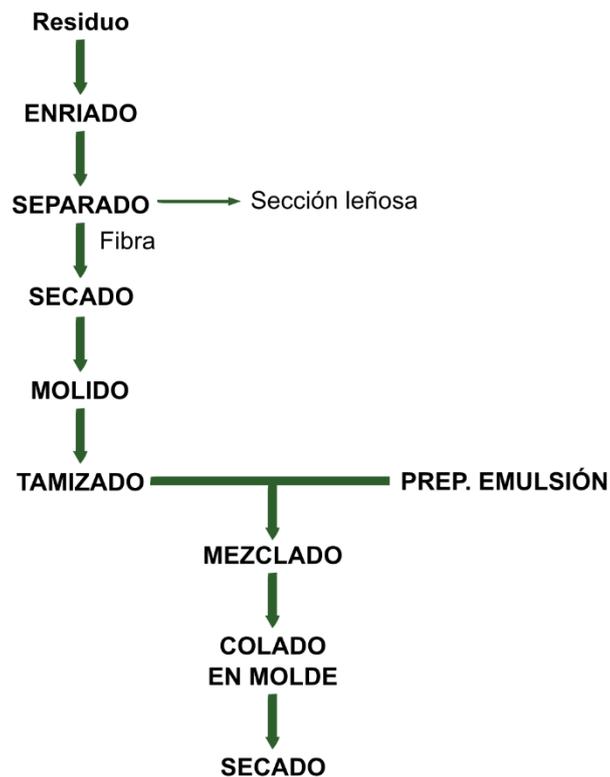
Para el proceso de experimentación:

En función de las experiencias realizadas y las conclusiones obtenidas, proponemos un esquema más adecuado para continuar la investigación, por ser más eficiente en tiempo y consumo energético.

Este esquema propone el fraccionamiento del residuo entre fibra y parte leñosa por ser dos materiales con posibilidades de aplicaciones diferentes.

Proponemos la utilización únicamente de la fibra como carga en las membranas y no del material integral. Algunas posibles aplicaciones de la parte leñosa fueron presentadas en el capítulo anterior.

Veremos a continuación los procesos a seguir.



Esquema 16: Propuesta de proceso para experimentación

Proponemos comenzar con un enriado, que se realizará colocando el residuo entero dentro de un recipiente y agregando agua destilada, hasta cubrir el doble del volumen del material. Deberá cerrarse herméticamente y dejarlo estacionar hasta que la fibra se separe al deslizar el dedo sobre los tallos. Este proceso puede requerir al menos 72 hs, dependiendo del volumen y la temperatura con la que se trabaje.

Finalizado este período se deberá separar manualmente la fibra de las partes leñosas, aprovechando la humedad existente en el material. Esto hará que se separen fácilmente.

De aquí en adelante, los pasos coinciden a los que realizamos en nuestra primera experiencia, con la diferencia de que solamente se trabajará con la fibra.

Se deberá secar en horno para dejarla con un máximo de 2% de humedad, porcentaje apto para la molienda. Luego del molido y el tamizado ya se dispondrá de la fibra para usarla como carga.

Para el desarrollo del material:

A pesar de la falta de adhesión entre las partículas y la matriz, ciertos comportamientos en las diferentes granulometrías podrían mejorarse a través de la reformulación del material.

Podemos sugerir diferentes caminos en los que se podría continuar investigando.

Las granulometrías finas podrían ser utilizadas en materiales para sustituir plásticos, cartón u otros materiales usados en packaging.

Las granulometrías gruesas podrían ser utilizadas en la fabricación de paneles o tableros aglomerados, con usos similares al MDF (medium-density fiberboard).

Un tercer camino consiste en adherir a las caras exteriores del material una película protectora que a su vez aporte estructura, de forma de obtener un material biocompuesto laminado híbrido.

En el caso de continuar la experimentación usando granulometrías mayores a 150 μm recomendamos el proceso de enriado, para obtener una materia prima más homogénea.

Es recomendable reducir la proporción de PVA en la matriz, con el objetivo de disminuir la saturación presente en la emulsión, ya que luego del secado las partículas no disueltas generaron espacios vacíos, disminuyendo la resistencia al quiebre del material.

Reflexiones

La primera dificultad con la que nos encontramos al realizar este trabajo, fue la falta de conocimientos específicos en diferentes áreas. Comprendimos que debíamos entender sus terminologías, principios básicos y tipos de procesos. A través de varias reuniones con profesionales, comenzamos a entender la problemática planteada desde diferentes puntos de vista, que luego debimos unificar, para verlos desde nuestra área, el diseño industrial.

Nuestra carrera nos llevó a desarrollar una metodología de trabajo propia, que nos permite identificar los procesos que se deben realizar para enfrentar un problema y llegar a una solución interdisciplinaria, considerando factores proyectuales, tecnológicos, socioambientales, industriales y de mercado. Podemos partir de una idea, pero la solución se construye paso a paso y se va transformando mientras avanzamos.

El Diseño Industrial articula y ordena procesos, vinculando diferentes disciplinas, manteniendo la mirada desde su propia perspectiva, para alcanzar soluciones, en este caso, una propuesta de valorización para los componentes de un residuo.

El camino recorrido para el desarrollo de este trabajo fue arduo, requirió de mucho aprendizaje de mucha ayuda y colaboración. Pero es apenas el primer paso para la investigación e innovación con este material, ya que requiere aún de profundización.

La implementación de esquemas tan complejos como los de biorrefinería traspasan a cualquier disciplina, y se perfila como un nuevo paradigma industrial, que puede ser aplicado en escalas relativamente pequeñas potenciando el desarrollo tecnológico, económico, social y educativo.

Bibliografía

- Askeland, R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. International Thomson Publishing.
- Bismarck, A.; Baltazar, Y.; Jimenez, A.; Sarikakis, K. (2006) Green composites as panacea Socio-economic aspects of green materials. *Environ Dev Sustain*; 8: 445–463.
- Campos, A. R. (2014). *Deslignificación Enzimática De Materiales Lignocelulósicos De Interés Industrial*. Universidad de Sevilla, España.
- Chernova, T.; Mikshina, P.; Salnikov, V.; Ageeva, M; Ibragimova, N., Sautkina, O. Gorshkova, T. (2017, December). Development of Hemp Fibers: The Key Components of Hemp Plastic Composites. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/57169>
- Clauser, N. M. (2018). Estudio técnico-económico de la Biorrefinería de los residuos de industrialización primaria de la madera y agroindustriales. Universidad Nacional de Misiones, Argentina.
- Fassio, Alberto; Rodríguez, Marcelo J.; Ceretta, Sergio (Ed.). (2013). *Cáñamo (Cannabis sativa L.)* (boletín de Divulgación N°. 103). INIA.
- Fengel, D.; Wegener, G. (1984). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. De Gruyter, Berlin, Alemania.
- Fetterman, P.S.; Keith, E.S.; Waller, C.W.; Guerrero, O.; Doorenbos, N.J.; Quimby, M.W. (1971). Mississippi-grown *Cannabis sativa L.*: Preliminary observation on chemical definition of phenotype and variations in THC content versus age, sex, and plant part. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 60:1246-1249.
- Kozłowski, Ryszard; Władyka-Przybylak, Maria. (2004). Uses of Natural Fiber Reinforced Plastics. *Natural Fibers, Plastics and Composites*. 249-274. 10.1007/978-1-4419-9050-1_14.
- Lachenmeier, D.; Walch, S. (2005). Analysis and Toxicological Evaluation of Cannabinoids in Hemp Food Products. *Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 4, 1, 812-826.
- Lachenmeier, D.; Kroener, L.; Musshoff, F.; Madea, B. (2004). Determination of cannabinoids in hemp products by use headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 378, 183-189
- López Neila, J. C.; Acedos y Ruiz Fuertes; B. Ruiz Fuertes.; Acedos, M G. (2020). *Biorrefinerías, el futuro para la transición hacia la (bio)economía circular*.

- Luévanos, P.; Vázquez, O.; Nagamani, B; Romero, L.; Loera, P. (2014). Biocatalizadores: Desarrollo Tecnológico de Enzimas con Beneficios a Gran Escala. In Cueto Wong, M. C.; De la Fuente Salcido, N.; Luévanos, P. *Fronteras en Microbiología Aplicada* (pp. 89–150). Universidad Autónoma de Coahuila, México. https://www.researchgate.net/publication/272787475_Biocatalizadores_Desarrollo_tecnologico_de_enzimas_con_beneficios_a_gran_escala
- Manosalva Barrera, J. C. et al. (2020). Holistic Study on the Production of Paper from Industrial Hemp in Colombia. *Revista Mutis*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100010>
- Mediavilla, V.; Leupina, M; Keller, A. (2001). Influence of the growth stage of industrial hemp on the yield formation in relation to certain fibre quality traits. *Ind. Crops Prod.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669015001053?via%3Dihub>
- Ming, L; Dinesh, F.; Geoffrey, D.; Madsen, B.; Meyer, A. S.; Thygesen, A. (2015). Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. *Industrial Crops and Products*, Vol 69, 29–39. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015001053>
- Oujai, S.; Shanks, R.A. (2005). Morphology and structure of hemp fiber after bioscouring. *Macromol. Biosci.*
- Sankari, H.S. (2000). Towards Bast Fiber Production in Finland: Stem and Fibre Yields and Mechanical Fiber Properties of Selected Fibre Hemp and Linseed Genotypes. University of Helsinki, Finland.
- Shahzad, A. (2011). Chemical composition of hemp fibers as reported by different authors. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998311413623>
- Stevulova, N.; Cigasova, J.; Estokova, A.; Terpakova, E.; Geffert, A.; KAcik, F.; Singovszka, E.; Holub, M. (2014) "Properties Characterization of Chemically Modified Hemp Hurds" *Materials*, 7, 8131-8150. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5456447/>
- Van der Werf, H.G.M. (1994). Crop physiology of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). PhD thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 153 pp.
- Zakzeski, J.; Bruijninx P. C. A.; Jongerius, A. L.; Weckhuysen, B. M. (2010). The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. *Chemical Reviews*, 110, 3552-3599.
- Zhang, Y. P.; D et al (2007). Fractionating Recalcitrant Lignocellulose at Modest Reactions Conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 97 (2), 214-223.

PÁGINAS WEB

Descripción de la planta Cannabis Sativa. (2012, febrero). tecnicoagricola.es.
<https://www.tecnicoagricola.es/descripcion-de-la-planta-cannabis-sativa/>

Anexos

Anexo 1: Caracterización química del residuo en Uruguay

Las muestras para los estudios realizados se obtuvieron de las tres plantaciones (A, B y C) que tomamos como modelo, mencionadas en la sección "Manejo del cultivo".

Se realizaron los siguientes estudios sobre seis muestras de cáñamo identificados por numeración correlativa. Las muestras 1 y 2 corresponden a tallos enteros sin enriar, obtenidos en las plantaciones A y B respectivamente, en tanto que las muestras 3 a 6 corresponden a fibras enriadas.

Las muestras 3 y 4, provienen de la plantación B, las 5 y 6 corresponden a la plantación C. En ambos casos la primera proviene de fibras de tallos y la segunda de fibras de rama primaria.

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de CENUR NORESTE, sede Tacuarembó, de UdelaR, de acuerdo con los protocolos del US National Renewable Energy Laboratory (Sluiter et al., 2011) y a Métodos de análise em química da madeira. série técnica (Abreu et al., 2006).

Las muestras 1 y 2 se molieron en molino rotatorio (Marconi Ltd, Piracicaba, Brasil), hasta aproximadamente 0,5 mm de diámetro. Las muestras 3 a 6 se molieron en un molino para pasto, llegando a una granulometría adecuada para aplicar los mencionados protocolos. Una vez finalizado el molido, se determinó en todas el contenido de humedad por secado en horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener un peso constante. Para las muestras 1 y 2 (las mayoritarias) se determinó además el contenido de cenizas y volátiles, por calentamiento en mufla a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Todas las muestras fueron extraídas con etanol en Soxhlet por 24 horas. Las muestras extraídas se sometieron al análisis de Tenor de celulosa a partir de la reacción con ácido sulfúrico, Tenor de holocelulosa por cloración y Tenor de lignina (soluble y Klason). La determinación de la lignina soluble se realizó a 320 nm, en espectrofotómetro.

Todos los valores obtenidos son en base seca. El tenor de celulosa se determinó a partir de su reacción con ácido nítrico y no a partir de la holocelulosa. Esta última se determinó por deslignificación selectiva con clorito de sodio. Se utilizaron ambos métodos para obtener más información ya que ambos métodos en la práctica tienen ciertas particularidades. Por ejemplo, la preparación de una holocelulosa siempre implica alguna pérdida de carbohidratos y en la mayoría de los casos, también retención de pequeñas cantidades de lignina (lignina residual) (Vuorinen y Alen, 1999).

Todos los ensayos se realizaron por triplicado o quintuplicado.

Resultados

La tabla 14 muestra el contenido de humedad de todas las muestras (base seca) y el contenido de extractivos, determinado por unidad de masa de material seco. La tabla 15 presenta el contenido de cenizas y volátiles en las muestras 1 y 2.

Muestra	Humedad (%)	Extractivo (%)
1 Tallos Ent P1	9,3	7,22
2 Tallos Ent P2	5,1	6,15
3 Fibra Tallo P2	18,5	0,99
4 Fibra Tallo P3	13,8	0,5
5 Fibra Rama P2	15,6	0,98
6 Fibra Rama P3	8,8	0,66

Tabla 14: Contenido de humedad y extractivos en las muestras de cáñamo

Muestra	Cenizas (%)	Volátiles
1 Tallos Ent P1	3,5	94,75
2 Tallos Ent P2	2,8	94,81

Tabla 15: Contenido de cenizas y volátiles en las muestras de cáñamo

Anexo 2: Determinación de tiempos de tamizado

La tarea consistió en mezclar previamente una muestra de nuestro material molido para homogeneizarla. Se separó 50 gramos de la misma y se dejó durante un tiempo definido previamente por nosotros (15 minutos) en una tamizadora por vibración. Luego se midió cuánto material quedó en cada tamiz y se repitió el proceso hasta que las cantidades medidas en cada tamiz, prácticamente no variaron con respecto a la medición previa. Con eso definimos cuántas pasadas de 15 minutos eran necesarias para separar la carga por granulometría.

Los resultados se verán en la siguiente tabla:

Tamizada de material 50gr				
Tamiz	Pasada 1	Pasada 2	Pasada 3	Pasada 4
1,18 mm	1,13	0,68	0,57	0,47
600 μm	19,80	10,54	7,28	5,55
300 μm	22,33	28,21	31,06	31,85
150 μm	0,97	0,73	0,56	0,75
75 μm	3,16	4,94	5,23	5,55
45 μm	1,96	2,77	2,99	2,90
< 45 μm	0,39	1,37	1,84	1,84
TOTAL	49,74	49,24	49,53	48,91

Tabla 16: Representatividad de cada granulometría en la molienda

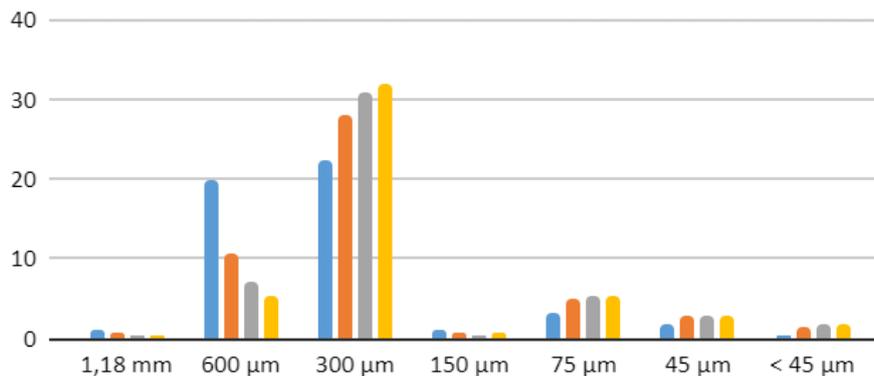


Gráfico 1: Granulometrías en cada tamizada

Esta experiencia nos permitió comprender que era necesario realizar 4 pasadas de 15 minutos para separar el material en las granulometrías deseadas. Es importante aclarar que, si bien el tiempo total no es el mismo, no obtuvimos el mismo resultado tamizando durante una hora continua, pues las fibras tienden a apilonarse si se prolonga el tiempo (ver imagen 24), formando estructuras que no permiten realizar un tamizado correcto. En caso de que existan, es importante romper estas estructuras manualmente cada vez que termina un período de 15 minutos.



Imagen 24: Estructuras en tamizados extensos

Anexo 3: Experiencia 1

La primera experiencia consistió en la realización de las membranas anteriormente descritas en la sección Experiencia 1, del capítulo 2 con una carga de material del 20 % en una relación peso/volumen en tres de ellas, más una muestra blanca, donde no se agregó material de carga.

La selección granulométrica de las unidades de muestra de la carga se realizó como se expresa en el esquema 17, diferenciándose notoriamente por su tamaño de partícula como se muestran en las imagen 25.

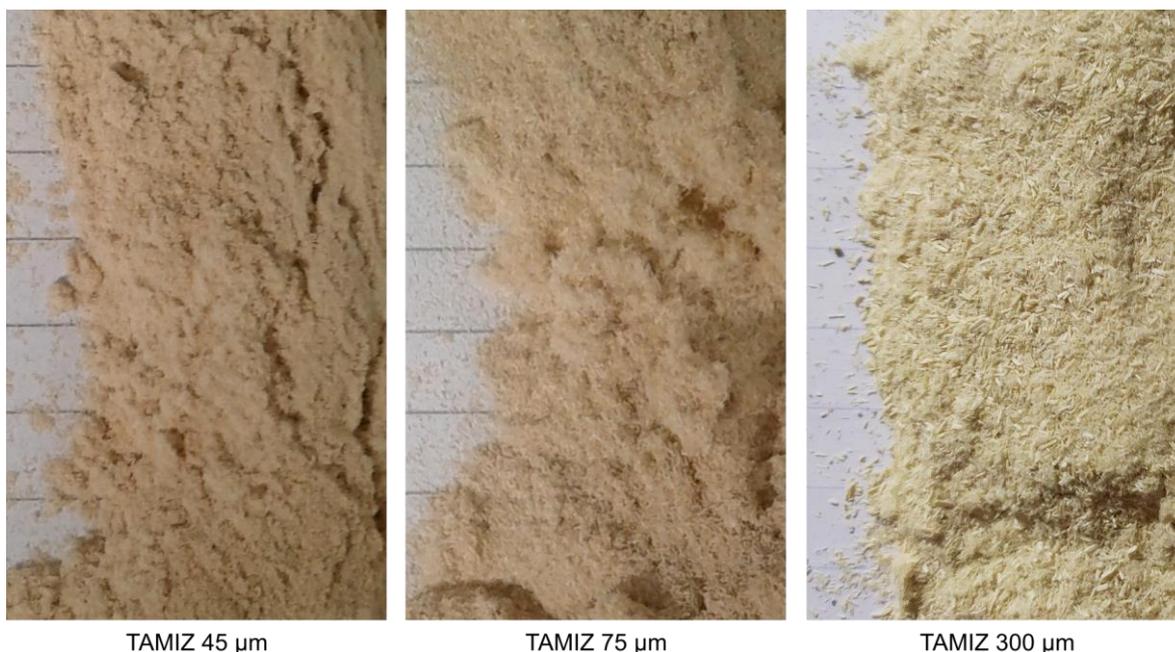


Imagen 25: Fotografías de cáñamo molido en diferentes granulometrías

Preparación del material de carga

Se partió de un material de residuo obtenido en una de las plantaciones de muestra, compuesto de tallos y ramas primarias trituradas y enfardadas. Secadas en invernáculo, con un contenido de humedad de un 11 %.

Para la preparación se realizó una molienda, y posteriormente un tamizado. La molienda fue realizada por el Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía, UDELAR. Por lo que no se cuenta con información detallada del proceso.

Previo a la separación final del material, fueron necesarias una serie de tamizadas, para determinar tiempo y cantidad de carga. Como resultado se obtuvo que era necesario un tiempo de tamizada de 15 minutos, repetido 4 veces con 50 gr de carga para los tamices utilizados. Se decidió utilizar tamices con apertura de 45 µm, 75 µm, 150 µm, 300 µm, 600 µm y 1,18 mm; obteniendo materiales mayores a 1,18 mm y menores a 45 µm.

Materiales

Residuo de cáñamo

Molino de cuchillas

Estufa

Tamices de malla metálica

Tamizadora Vibratoria

Balanza (apreciación $\pm 0,01$ gr)

Molienda

- Para la molienda se debió secar previamente en estufa foliar de aire forzado a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 48 hs.
- La molienda del material se realizó en molino de cuchillas con malla de 2 mm. Se realizaron dos pasadas del material por la misma malla, por no contar con medidas inferiores.

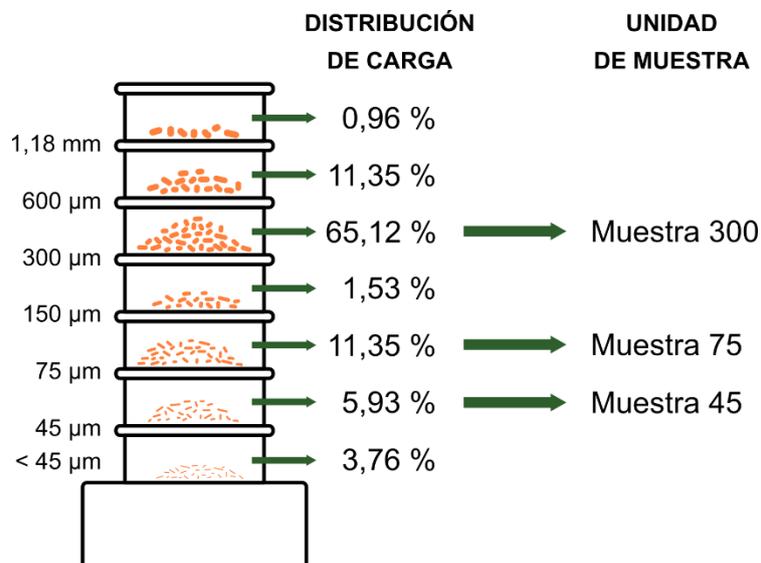
Tamizado

- Mezclar previamente una muestra para homogeneizarla.
- Medir 50 gr de material. Colocarlo en el tamiz con mayor apertura.
- Tamizar durante 15 min, observar la distribución y repetir 4 veces.

Definición de muestras granulométricas

La separación granulométrica nos permite obtener un material de carga más homogéneo, de esta manera podemos observar los comportamientos. Consistió en realizar una unidad de muestra por cada granulometría seleccionada como se observa en el esquema 17.

En las partículas mayores a $150\text{ }\mu\text{m}$ se observan fragmentos leñosos y fibras, mientras que en las granulometrías menores la apariencia es continua por su tamaño como partícula de polvo.



Esquema 17: Distribución de las granulometrías en el material de carga

Desarrollo de membranas cargadas

Materiales:

Aceite de soja

Tensoactivo, Tween 80.

Quitosano

Alcohol polivinílico

Material de carga (residuo de cáñamo medicinal)

Material de vidrio (placa de Petri)

Agitadores magnéticos y periféricos

Estufa

- 1- Para la fase continua, se utilizó 6 ml aceite de soja en un recipiente.
- 2- Se añadió 0,1 % (p/p) de Span 80, 2 ml.
- 3- Para la fase dispersa, se utilizó una solución de quitosano al 1,0 % (p/v) en ácido acético al 5 %, se tomó 28 ml de esta solución para incorporar lentamente (gota a gota) con agitación continua en el matraz con aceite de soja nombrado en el punto 1.
- 4- Posteriormente, se añadió 34 ml de solución de alcohol polivinílico al 10 % en la mezcla de ácidos.
- 5- Se agitó de forma constante durante 30 minutos con agitador magnético.
- 6- Se agregó 15 gr de material de carga a la emulsión obtenida en los pasos anteriores, en un vaso de bohemia y se mezcló con espátula metálica.
- 7- Se volcó el contenido dentro de una placa de Petri, previamente cubierta con Parafilm.
- 8- Se presionó la superficie de forma homogénea, aplanándola de forma manual con otra placa de Petri de menor diámetro.
- 9- Se midió las dimensiones de la muestra.
- 10- Se rotuló.
- 11- Se secó en el horno a 30 °C durante 24 hs.

Resultados:

Se obtuvieron tres membranas, cuyas dimensiones se vieron reducidas según la tabla:

Muestra	Masa final (gr)	Vol. Inicial (cm ³)	Vol. final (cm ³)	Cambio Vol (%)
300	22,71	69,09	64,77	-6,25
75	22,83	70,71	59,49	-15,87
45	23,18	76,52	44,67	-41,62

Tabla 17: Reducción de las membranas luego del secado en horno

Ensayos

Realizaremos ensayos para entender la interacción entre la matriz y la carga que componen las muestras. En muchos casos, se analizará también una muestra de membrana sin carga, con el objetivo de contrastar con ella los valores obtenidos para cada granulometría.

Ensayo de Absorción de Humedad

OBJETIVOS

Observar el comportamiento absorbente del material sumergido en agua en función del tiempo.

Observar cómo se ve afectada la cohesión entre matriz y carga.

CONDICIONES DE ENSAYO

Atmósfera: agua

Temperatura ambiente controlada a 18 °C.

MEDICIONES

Se realizan mediciones de masa a las 24 hs, 72 hs y a la semana de sumergir el material.

Resultados:

Muestra	% Absorción de humedad		
	Día 1	Día 3	Día 7
45	135,47	135,47	163,32
75	171,51	146,18	190,86
300	103,04	135,04	186,06

Tabla 18: Absorción de humedad: Experiencia 1

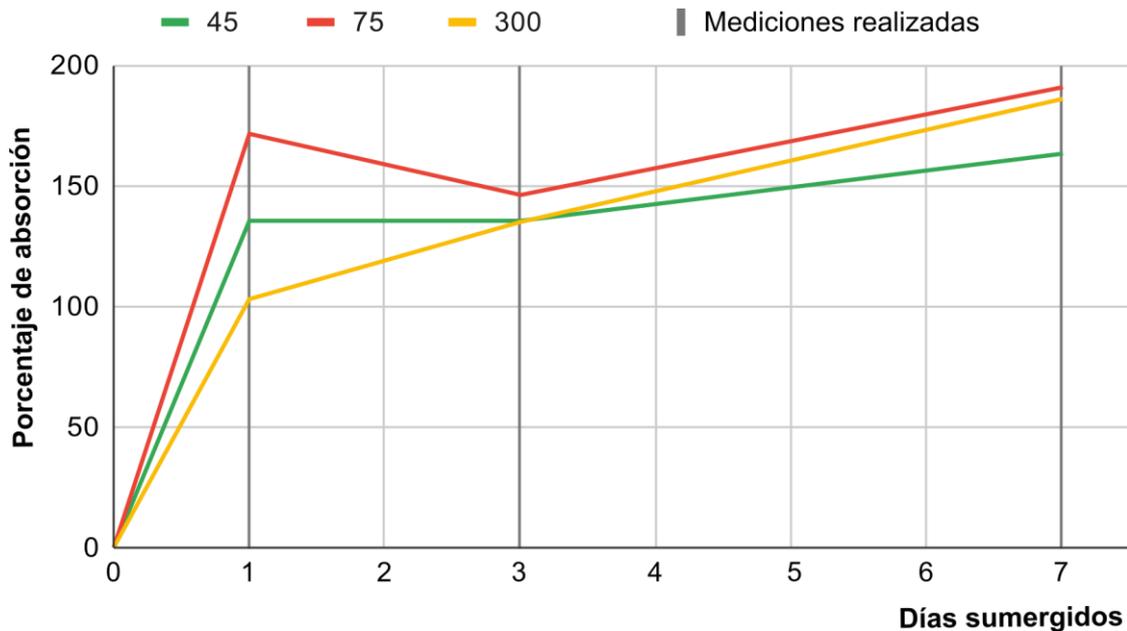


Gráfico 2: Absorción de humedad: Variación de masa (Exp. 1)

Observaciones

- En la muestra de membrana con carga 300 μm se comenzó a separar material en el momento de ser sumergida en agua y durante las mediciones siguientes continúa el mismo camino, como se ve en las fotografías mostradas a continuación (ver imagen 26). En las demás membranas no hay cambios aparentes o apreciables a simple vista.
- El mayor porcentaje de humedad absorbida se da en las primeras horas de absorción.
- En las tres membranas se ve que a las 24 hs, la curva de la gráfica presenta un quiebre, lo que puede sugerir el punto crítico de saturación.
- Se observa que en la medición del día 3, a las 72 hs de ser sumergidas, parece haber una disminución del porcentaje de agua absorbida. Debemos recordar que las muestras se realizan a partir de material compuesto heterogéneo, pudiendo afectar la linealidad del comportamiento.



Imagen 26: Aspecto de la muestra después de la sumersión
De izquierda a derecha: a las 24 hs, 48 hs, 1 semana y 2 semanas

- En la imagen 26 se perciben apariciones de hongos en las muestras de 1 semana y 2 semanas (éstas últimas medidas no fueron registradas). Se desconoce el porqué de la presencia de estos hongos, pero pudieron haberse desarrollado por estar presentes en el ambiente, o por haber sido activados con la humedad y temperatura estando ya presentes en el material de carga.
- Luego de que el material fue retirado del agua, retomó la consistencia inicial en la medida que fue secándose.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, es un material de rápida absorción de agua, con baja resistencia a la misma, con la ventaja de no perder cohesión en los casos de cargas con granulometrías finas (45 y 75 μm). Mientras que la carga de 300 μm no mantuvo cohesión desde el primer momento del ensayo, mostrando pérdida de masa.

Microscopía Óptica

OBJETIVOS

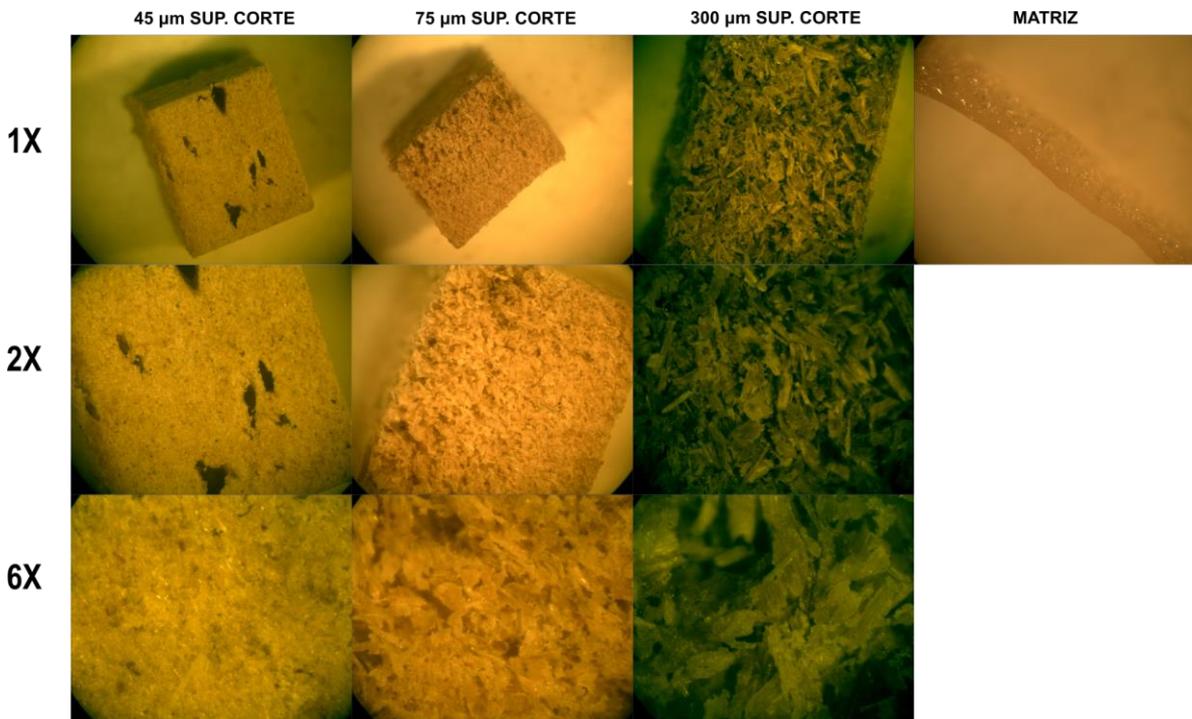
Entender el tipo de interacción se produjo entre la carga y la matriz, observando la microestructura de la superficie exterior e interna de la membrana.

Observaciones:

Cuando vemos las imágenes de la cara superior se observa que la matriz cubrió los espacios entre las partículas de carga, para todas las granulometrías.

Si miramos las superficies que fueron cortadas, en todas las granulometrías se observa la presencia de burbujas de aire, que quedaron dentro de la membrana al momento de colocarla en el molde y presionarla con los dedos. La membrana de granulometría 45

es la que quedó más compacta, a pesar de ser la que quedó con burbujas de mayor tamaño. Si empezamos a mirar la muestra de granulometría 75, se observan cambios notorios con respecto a la anterior, pues aparecen espacios entre vacíos entre las partículas, que no fueron completados con la matriz. En la membrana de 300 se observa claramente como las partículas se cruzan entre ellas y no existe rastro alguno de la matriz.



**Imagen 27: Microscopía óptica de fibra del residuo de cáñamo
Vista de superficie de corte.**

Conclusiones:

La textura más homogénea y compacta obtenida en la cara superior de las muestras, en relación con las superficies de corte, puede explicarse porque el contacto con el aire caliente dentro del horno ocasiona que la matriz se seque más rápido, sin darle tiempo a que se absorba, como sucede en el interior de la membrana.

La relación entre las cantidades de carga y matriz probablemente no haya sido la adecuada, sobre todo en las muestras de granulometría 300, pues quedaron espacios vacíos entre las partículas de carga, producto de la absorción que pueden haber realizado.

Es importante realizar un prensado de las membranas para eliminar el aire que queda atrapado en el momento mezclado y colocado en el molde.

Ensayo de Tensión y Tracción

La norma establece que para realizar este tipo de ensayos se necesitan 5 probetas por cada una de las unidades de muestra que se desea analizar. El molde que nos fue proporcionado para cortar las probetas era capaz de crear probetas de 12,5 cm de largo y de 2,5 cm de ancho. Las membranas que hicimos para este primer ensayo se realizaron en diferentes placas de Petri, cuyos diámetros rondaban los 10 cm, por lo cual

se descartó efectuar este ensayo por carecer de una membrana lo suficientemente grande para sacar las 5 probetas necesarias de cada tipo.

TGA y DSC

Para nuestro estudio contamos con la colaboración del Prof. Adjunto de Ciencias Físicas y sus Aplicaciones, Mauricio Rodríguez, del PDU del Centro Universitario Regional del Este (CURE) Sede Rocha, quien analizó nuestras muestras en el equipo Netzsch STA 449 F5 Jupiter.



Imagen 28: Equipo Netzsch STA 449 F5 Jupiter

Compartimos el informe redactado por el Ingeniero de Materiales Luis Toro, que presentó en colaboración con nuestro trabajo, su proyecto final de Técnicas de Estudio de Materiales dictado en Facultad de Ingeniería de UdelaR.

OBJETIVO

- Identificar los rangos de temperaturas en los que ocurren eventos térmicos para las formulaciones propuestas, así como también las de sus componentes (carga y matriz) por separado.
- Llevar a cabo un análisis en busca de variaciones en dichas temperaturas que pudiesen estar relacionadas a interacciones entre los componentes de las formulaciones.

CONDICIONES DE ENSAYO

Rango de Temperaturas del Barrido (K) 303-873

Velocidad de Calentamiento (K/min): 10

Atmósfera: Aire

Crisol: Aluminio

Resultados:

Resultados obtenidos del material de carga

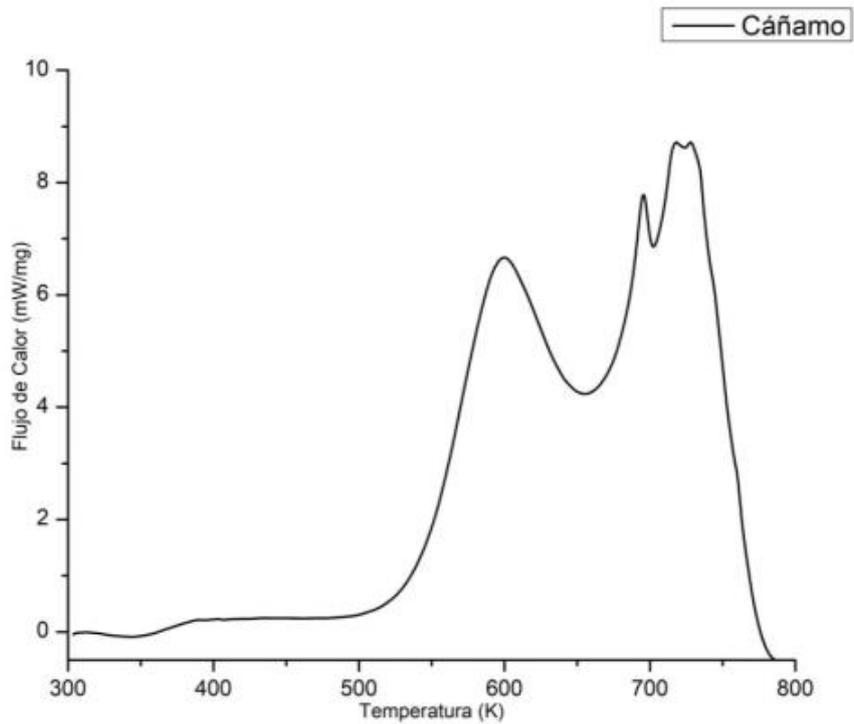


Gráfico 3: Análisis DSC del material de carga

Temperatura de Descomposición (K)	Componente	Tipo de Reacción
393-623	Celulosa	Exotérmica
493-588	Hemicelulosa	Exotérmica
553	Pectina	Endotérmica
553-773	Lignina	Exotérmica

Tabla 19: Temperaturas de degradación de componentes del cáñamo

Pico	Temperatura (K)	Tipo de Reacción	Asociado a
1	323-388	Endotérmica	Evaporación de agua
2	390-640	Exotérmica	Descomposición de celulosa, hemicelulosa y pectina.
3	660-700	Exotérmica	Descomposición de lignina
4	700-800	Exotérmica	Descomposición de residuo carbonizado

Tabla 20: Eventos térmicos y picos estudiados del cáñamo

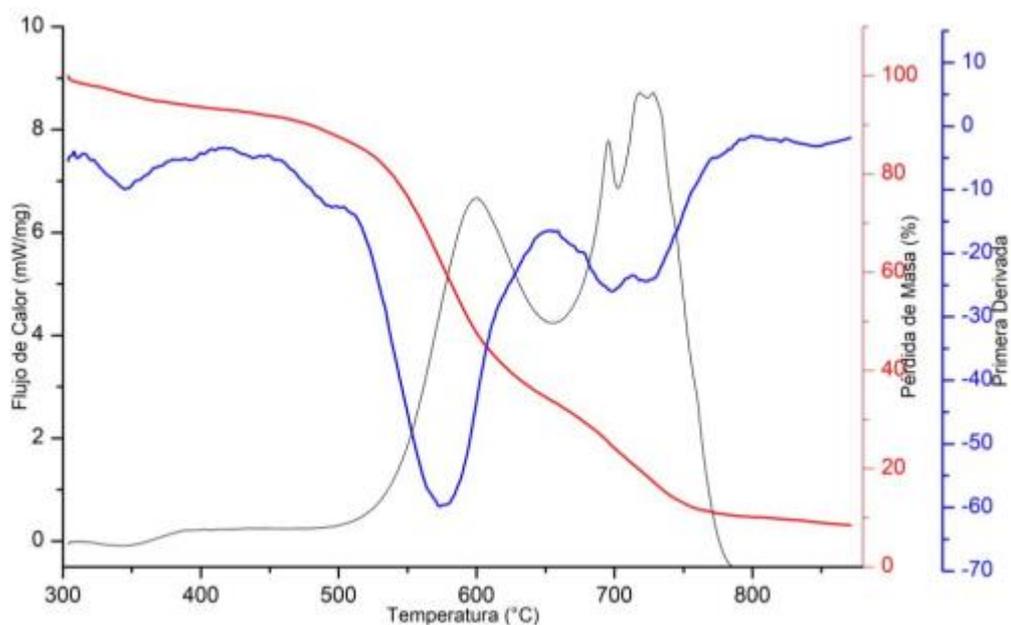


Gráfico 4: TG/DSC del cáñamo

Resultados de la Matriz (PVA/ Quitosano)

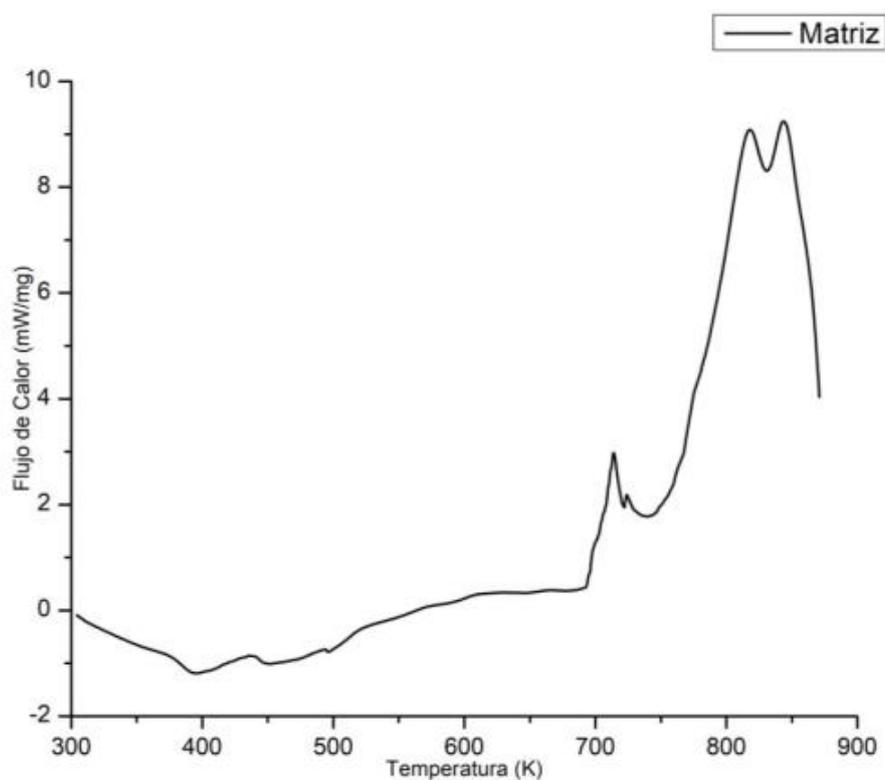


Gráfico 5: Análisis DSC del material de carga

Rango de Temperaturas (K)	Pérdida de Masa (%)	Evento
323-400	5	Evaporación de agua
414-520	32	Eliminación del ácido acético residual y fusión de cristales de PVA
523-673	8	Descomposición del quitosano
693-723	9	Descomposición del aceite de soja
723-823	27	Descomposición de residuo carbonizado

Tabla 21: Temperaturas de degradación de componentes de la matriz

Pico	Temperatura (°C)	Tipo de Reacción	Asociado a
1	323-400	Endotérmica	Evaporación de agua
2	414-450	Exotérmica	Eliminación del ácido acético residual
3	470-500	Endotérmica	Punto de fusión de la parte cristalina de PVA
4	523-673	Exotérmica	Descomposición del quitosano
5	693-723	Exotérmica	Descomposición del aceite de soja
6	723-860	Exotérmica	Descomposición de residuo carbonizado

Tabla 22: Eventos térmicos y picos estudiados de la matriz

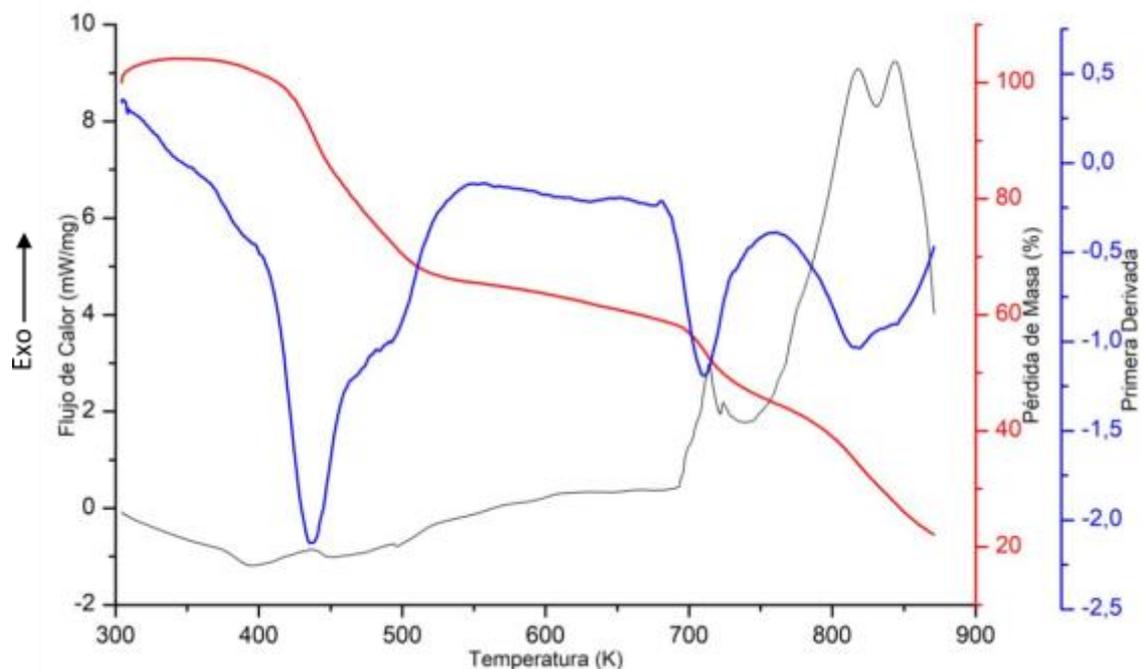


Gráfico 6: TG/DSC de la matriz

Resultados de las muestras

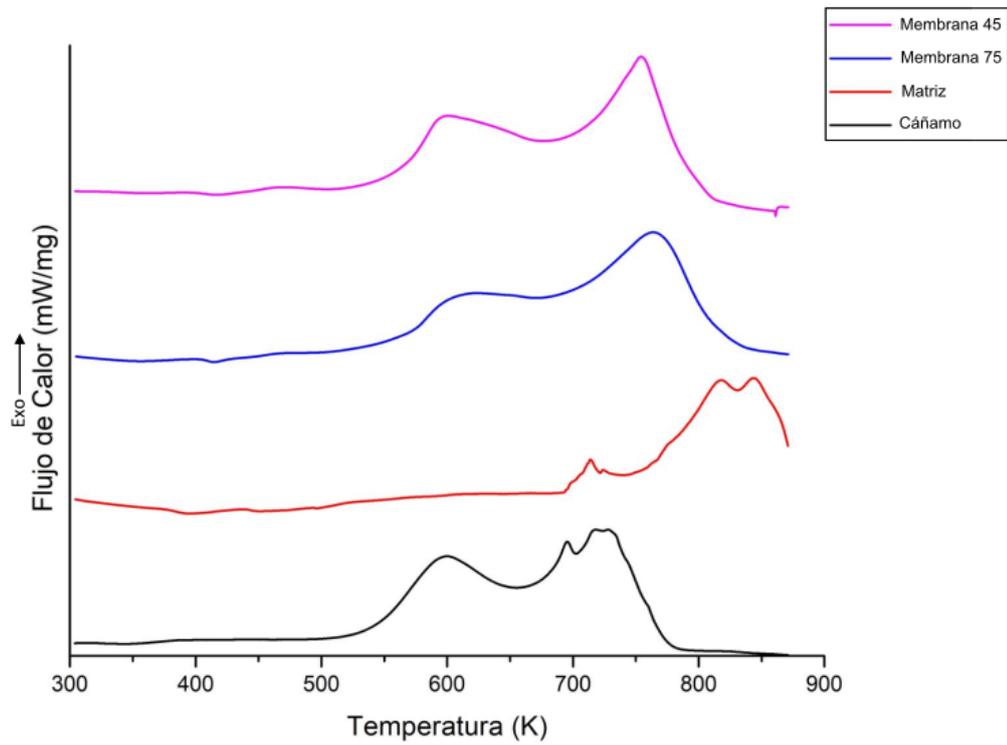


Gráfico 7: DSC de las muestras

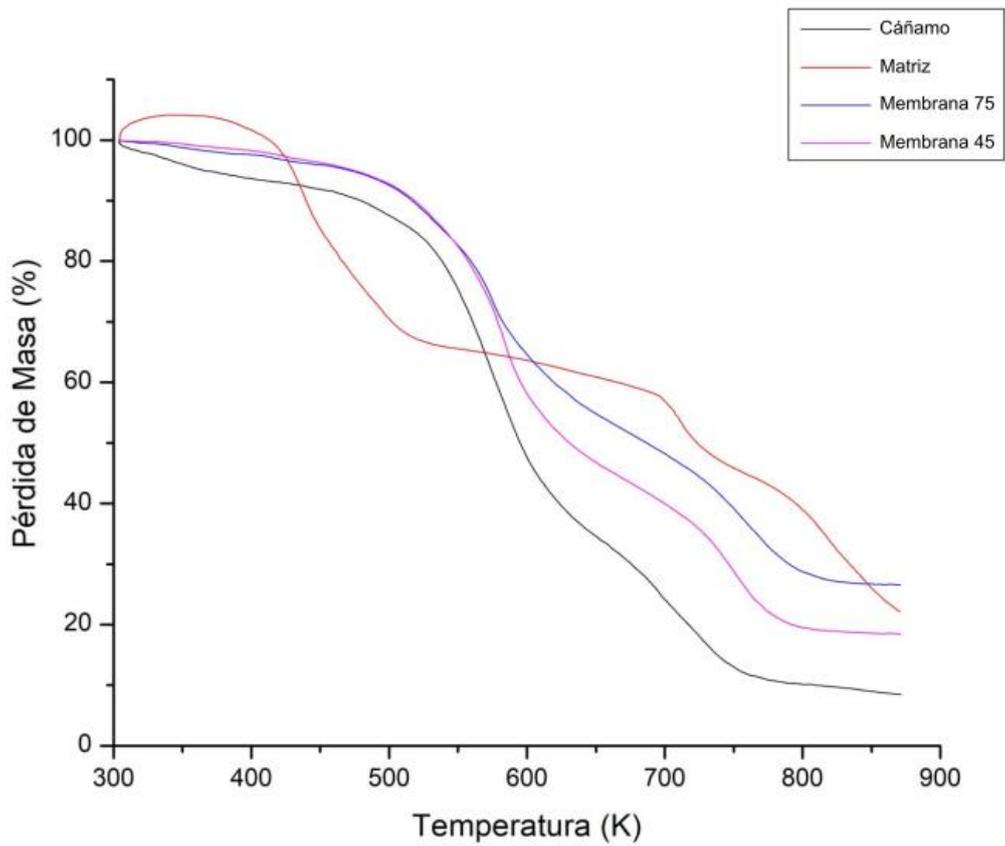


Gráfico 8: TGA de las muestras

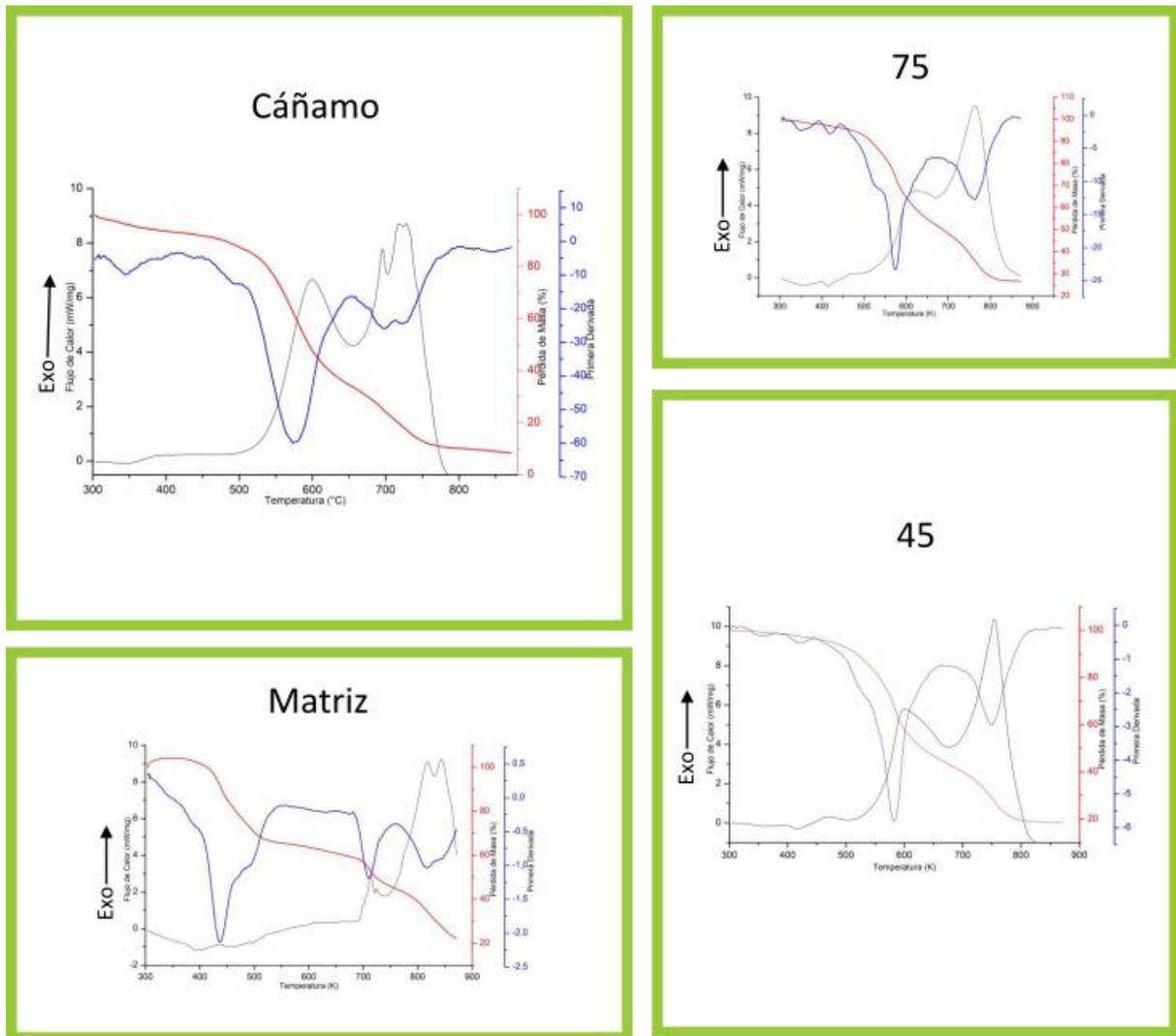


Gráfico 9: TGA/DSC

CONCLUSIONES

- Los ensayos de TGA y DSC permitieron identificar los distintos eventos y reacciones que ocurren en las muestras a medida que se incrementa la temperatura. Así como también las pérdidas de masa y la naturaleza de las reacciones.
- Conocer e identificar estos fenómenos en la matriz y la carga por separado, permitieron identificar evidencia de posibles interacciones entre dichos componentes cuando son mezclados para formar un material biocompuesto.
- Fue posible comparar la estabilidad térmica de cada formulación, resultando en una mayor estabilidad en la mezcla que cuenta con la granulometría de menor tamaño.
- No fue posible identificar con exactitud la naturaleza de las interacciones que se observaron entre la matriz y la carga, para obtener dicha información se recomienda recurrir a otra técnica de estudio de materiales.

Anexo 4: Experiencia 2

Moldes:

Se construyeron moldes específicos para esta etapa utilizando un sistema de molde y contramolde, con el objetivo de prensar las muestras antes de secarlas en horno.

Las dimensiones de la hembra fueron 15 x 15 x 2,5 cm de altura.

El macho, que recibe la presión de la prensa hidráulica y la distribuye sobre la membrana, mide aproximadamente 15,1 x 15,1 x 3,2 cm de alto. La tolerancia entre dichas piezas es de 0,2 mm, suficiente para que puedan deslizarse sin problemas. A continuación se puede observar imágenes de los moldes.



Imagen 29: Moldes usados en la Experiencia 2
A la izquierda: Macho y hembra. A la derecha: Conjunto armado.

Preparación del material de carga

Se partió del mismo material secado molido y separado granulométricamente en la experiencia 1.

Se añadió a la preparación del material un proceso de enriado.

El enriado es un proceso de separación de las fibras de un material de su parte leñosa y de su corteza por disolución en agua de la pectina.

Existen varias formas de separar la fibra de los otros componentes de la planta como el enriado en campo, pero nosotros lo hicimos por sumersión en agua, y consiste en sumergir el material durante un tiempo determinado, sometiéndose a temperaturas mayores a 18 °C.



Imagen 30: Enriado del material

Al agregar este paso, quisimos comprobar si el residuo se comporta dentro de la membrana de la misma manera con enriado o sin enriado, al intentar aprovecharlo integralmente.

Luego de ser secado, se realizaron nuevas muestras granulométricas por agrupación de tamaños como se explica en el siguiente apartado de “Definición de muestras granulométricas”.

Materiales para el enriado

Recipientes plásticos

Agua destilada

Material separado granulométricamente

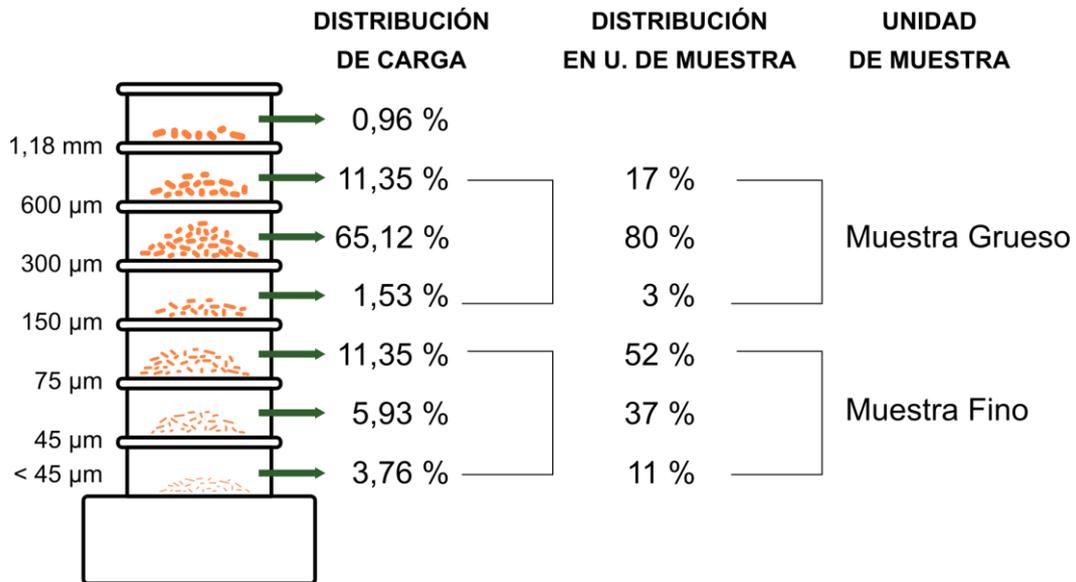
Papel Film

Malla de tela de algodón (filtro)

- Se colocó cada material seco y molido, en un recipiente plástico previamente identificado con la granulometría correspondiente.
- Se agregó agua destilada en forma abundante hasta cubrir el doble del volumen del material.
- Se cerró herméticamente con papel film, permaneciendo por 72 hs.
- Cada material fue filtrado con una malla de tela de algodón, similar a la usada en la fabricación de quesos artesanales. Posterior secado.

Definición de muestras granulométricas

Para esta experiencia se utilizaron los mismos tamices que en la etapa anterior (45 μm , 75 μm , 150 μm , 300 μm , 600 μm , 1,18 mm) realizando además dos muestras granulométricas nuevas: Gruesa y Fina. Cada una de estas muestras se compone de diferentes tamaños en los porcentajes como se muestra en el esquema 18.



Esquema 18: Agrupación de granulometrías en el material de carga

Decidimos mantener los porcentajes de distribución de las granulometrías como se encuentran en el material molido sin dividir, para mantener valores representativos si el proceso de separación de tamaños se simplificará.

Con estas nuevas agrupaciones se busca conocer si es necesaria una agrupación granulométrica tan compleja como en la primera experiencia para obtener un material que se comporte como compuesto, ya que el proceso de tamizado agregaría costos y dificultad a una producción en escala industrial.

Desarrollo de las membranas

Materiales

Material de vidrio

Tensoactivo, Tween 80.

Agitadores magnéticos y periféricos

Estufa

Aceite de soja

Quitosano

Alcohol polivinílico

Preparación de cada membrana (matriz):

Para la preparación de las membranas de quitosano:

1. Para la fase continua, se utilizó 14 ml aceite de soja en un recipiente.
2. Se añadió 0,1 % (p/p) de Span 80, 4 ml.
3. Para la fase dispersa, se utilizó una solución de quitosano al 1,0 % (p/v) en ácido acético al 5 %, se tomó 66,5 ml de esta solución y se incorporó lentamente (gota a gota) con agitación continua en el matraz con aceite de soja nombrado en el punto 1.
4. Posteriormente, se añadió 80 ml de solución de alcohol polivinílico al 10 % en mezcla de ácidos.

5. Se mantuvo una agitación constante durante 30 min, tratando de no generar burbujas.
6. Se agregó material de carga a la emulsión obtenida en los pasos anteriores según los porcentajes mostrados en el esquema 18, en vaso de bohemia y se mezcló con espátula metálica.
7. Se volcó el contenido dentro de molde de hierro, previamente cubierto con papel vegetal.
8. El siguiente paso consistió en dejar que las membranas cargadas empezaran en ambiente con temperatura controlada en 22 °C durante 48 hs.
9. Se realiza prensado en prensa hidráulica con manómetro, ejerciendo presión sobre molde hembra (hasta 2 T).
10. Se rotuló y se secó en horno a 50 °C durante 72 hs.

Ensayos

Absorción de Humedad

El ensayo de absorción de humedad se realizó en las muestras: 45, 75, Gruesa, Fina y Blanca. Se dejó de realizar en las membranas cargadas con granulometría 300 y 600 μm porque mostraron pérdida de masa al momento de ser cortadas, no siendo aptas para la medición. El procedimiento se mantuvo igual a la experiencia 1.

OBJETIVOS

- Conocer el comportamiento del material cuando es sumergido en agua.
- Comparar los resultados con los obtenidos en el mismo ensayo de la experiencia 1 y las nuevas membranas con cargas agrupadas.

CONDICIONES

Atmósfera: agua

Temperatura ambiente controlada a 18 °C.

MEDICIONES

Se realizan mediciones a las 24 hs, 72 hs y una semana después de ser sumergidas las muestras.

Resultados:

Muestra	% Absorción de humedad		
	Día 1	Día 3	Día 7
45	147,38	154,41	150,00
75	65,42	47,15	130,46
Gruesa	177,50	210,48	165,13
Fina	109,67	100,52	124,95
Blanca	188,51	201,45	221,62

Tabla 23: Absorción de humedad: Experiencia 2

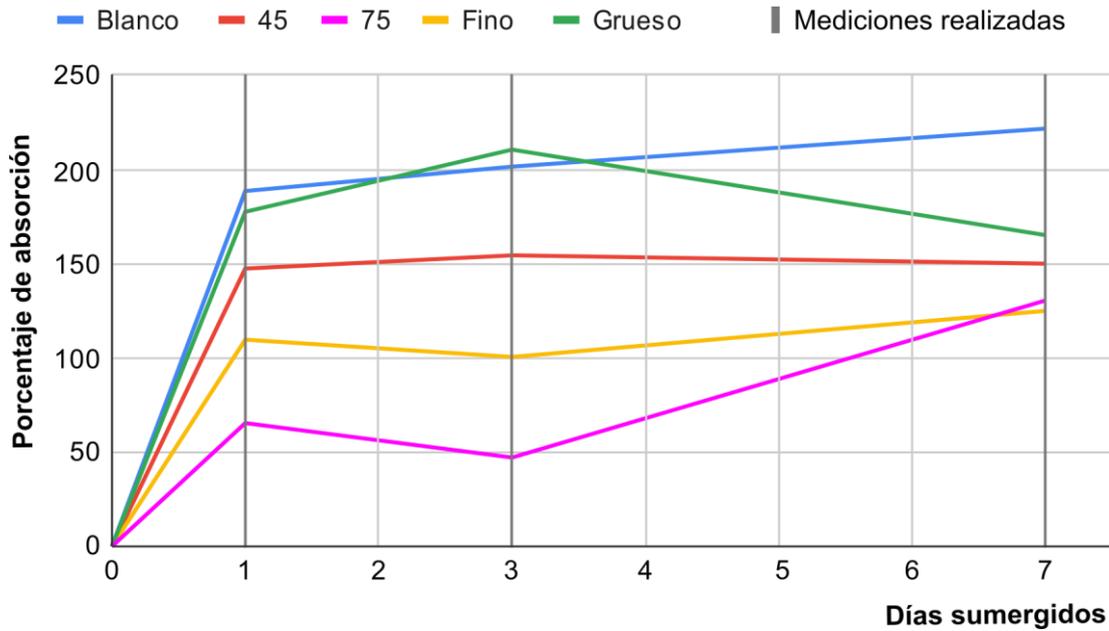


Gráfico 10: Absorción de humedad: Variación de masa (Exp. 2)

OBSERVACIONES

- Se observa que las curvas presentan el mismo comportamiento que en la experiencia 1. Mostrando el punto crítico de saturación a las 24 hs de ser sumergidas, comenzando a estabilizarse los valores luego de este punto.
- Si comparamos la muestra Blanca con el resto de las muestras, notamos una mejora en el comportamiento de absorción de la membrana al agregarle material de carga.
- No hubo presencia de hongos a la semana de ser sumergidos como en la primera experiencia.

COMPARACIÓN CON RESULTADOS CON EXP. 1

Absorción de humedad

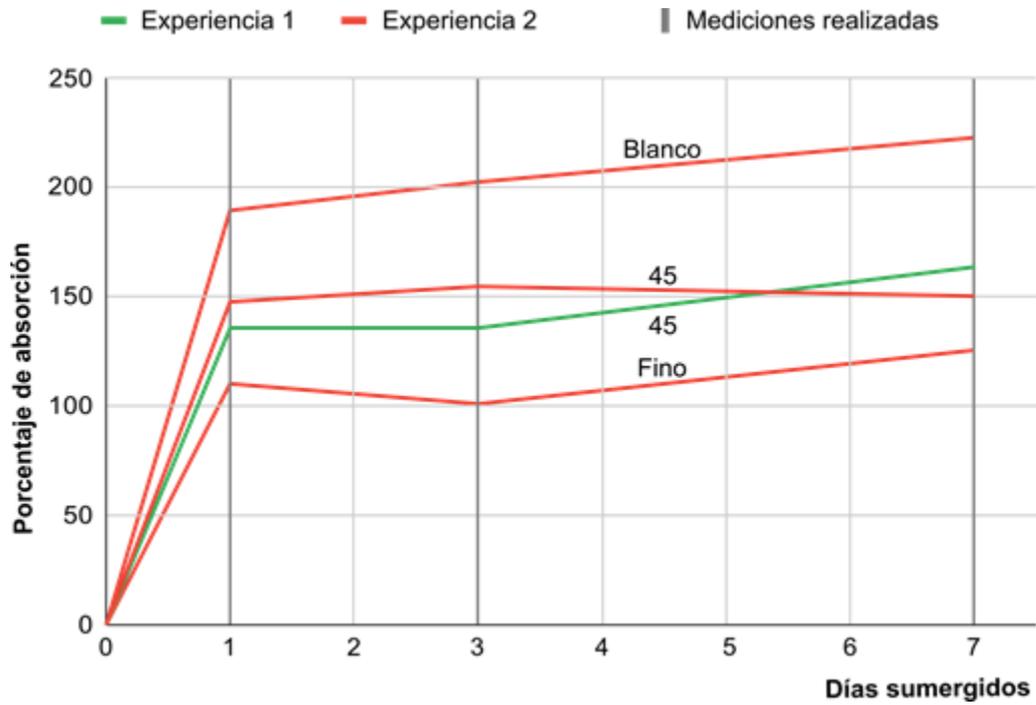


Gráfico 11: Absorción de humedad: Comparativo muestra 45

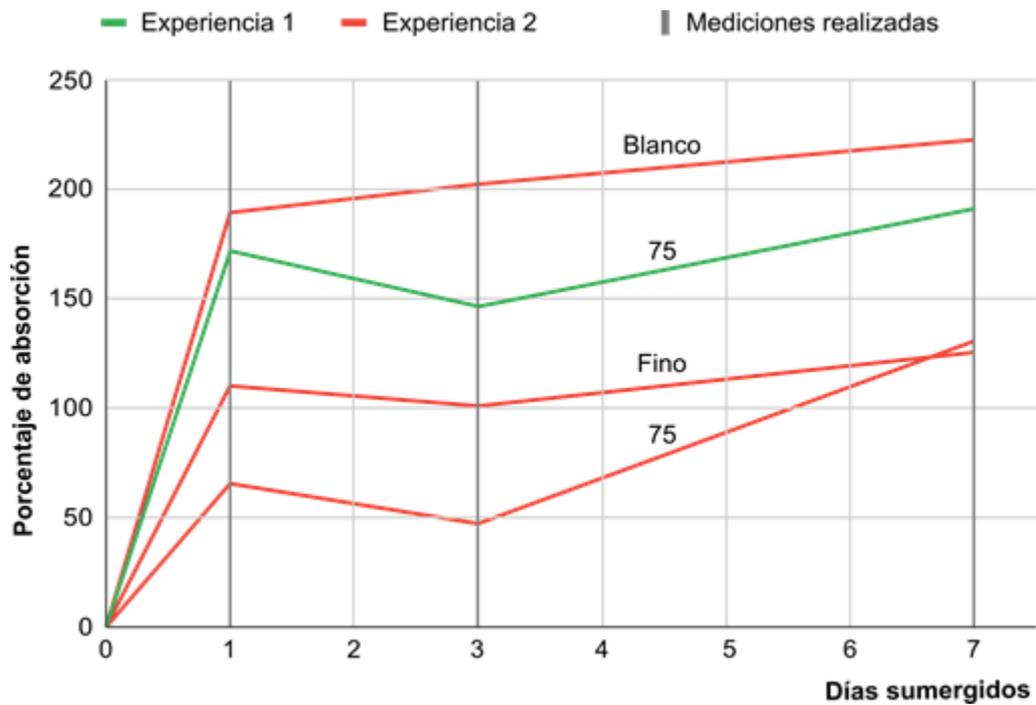


Gráfico 12: Absorción de humedad: Comparativo muestra 75

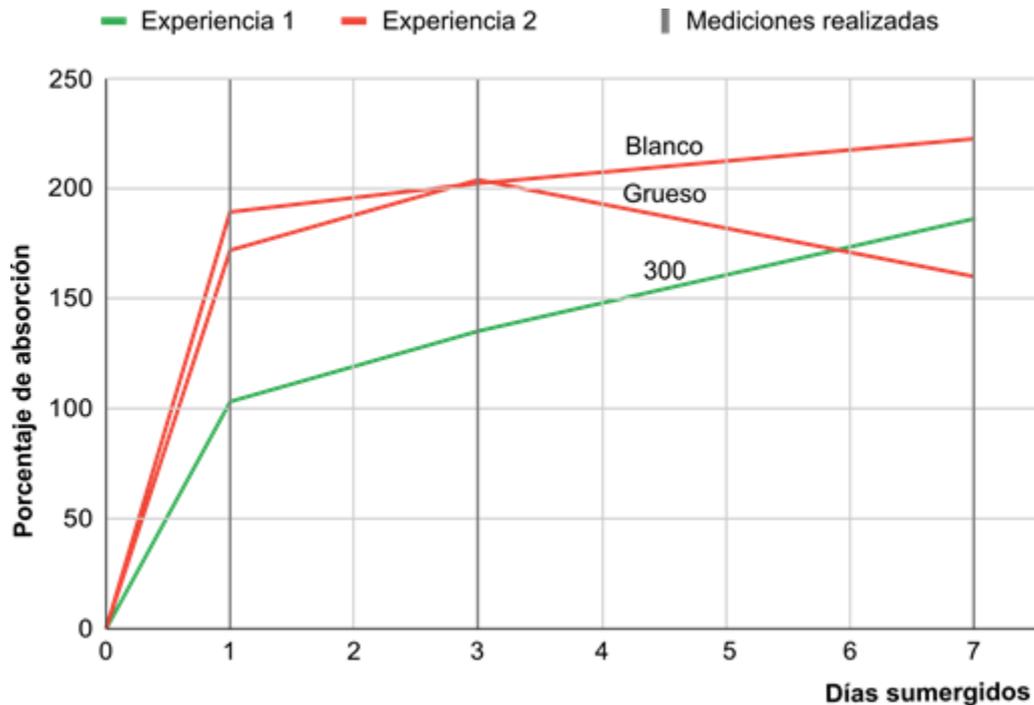


Gráfico 13: Absorción de humedad: Comparativo muestra 300

De los resultados de las experiencias de absorción de humedad, podemos concluir que las membranas de quitosano y PVA que contienen residuo de cáñamo como carga mejoran su comportamiento ante un entorno húmedo en todos los casos.

A pesar del prensado realizado en la segunda experiencia, las membranas 45 mantienen un comportamiento similar en ambas experiencias, en cambio la membrana de 75 mejora su comportamiento con el prensado.

En ambas experiencias las pruebas en membranas cargadas con granulometrías mayores a 300 μm no lograron compactación, ni una unión continua, por mostrar a simple vista heterogeneidad en su composición, con la presencia de material molido leñoso y fibroso.

Para trabajar con granulometrías iguales o superiores a 300 μm es recomendable realizar algún proceso adicional, como el enriado, y de esta forma procesar únicamente la fibra.

Ensayo de tensión

Desde el momento en que se intentó cortar las probetas para realizar el ensayo de tensión, empezamos a notar varios factores que nos hicieron dudar de la viabilidad de realizar este estudio. Inicialmente se usó una prensa hidráulica y un sacabocado (con la forma de la probeta requerida para el ensayo), con el objetivo de cortar las piezas por presión, pero sucedía que el material no se cortaba, sino que se desgranaba de forma muy poco uniforme, quitando material inclusive en la zona del cuello de la probeta.



**Imagen 31: Análisis de Tensión: Corte de probeta con sacabocado
Corte impreciso. Se desgrana el material**

Se decidió entonces usar la prensa hidráulica, con el único objetivo de marcar la superficie y luego usar una trincheta para cortar la probeta del resto de la membrana. Esa tarea tampoco fue sencilla, porque incluso usando una hoja bien afilada, cuando la trayectoria de la hoja tocaba las partículas más grandes, estas oponían resistencia y se separaban de la membrana, arrancando pequeños pedazos junto a ella. Este efecto se veía mucho menos en las muestras de granulometrías más pequeñas, pero si no se cortaba lentamente y con paciencia, también podía suceder.

Cuando finalmente se logró cortar las probetas deseadas (y luego de desechar varias que habían quedado muy dañadas), nos enfrentamos a la dificultad de colocarlas en las mordazas de la máquina, sin que se destruyan con solamente la fuerza que realizan las pinzas al sostenerla.

Al comenzar a tensionar sucedió que la mayoría de las probetas, fruto de los daños al sujetarlas, no rompían en la zona del cuello, sino en la zona de la pinza, lo que invalidaba el ensayo. Se decidió dar por concluida la experiencia luego de intentar tensar más de 10 muestras y no llegara a registrar valores de tensión de rotura, a pesar de que la máquina se encontraba en su escala más sensible.