

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE HÍBRIDOS
INTERESPECÍFICOS ENTRE *Eucalyptus grandis* Y *Eucalyptus dunnii***

por

Matías LUNA FERNÁNDEZ

Cristian Facundo RODRIGUEZ RODRIGUEZ

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2024

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. For. (Dra.) Ana Paula Coelho

Lic. Biol (Dra.) Marianella Quezada

Tribunal:

Ing. Agr. Agustin Rava

Ing. For. (MSc.) Franco Schinato

Ing. For. (Dra.) Ana Paula Coelho

Fecha: 20 de diciembre de 2024

Estudiante:

Matías Luna Fernández

Cristian Facundo Rodriguez Rodriguez

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a nuestra familia y amigos por el apoyo durante este camino, y a todo aquel que formó parte de este proceso, ya que sin ellos no hubiera sido posible.

Agradecemos a la empresa UPM Forestal Oriental que nos proporcionó las muestras y datos para poder realizar este trabajo. Este trabajo se enmarca en las actividades del proyecto “Desarrollo y aplicación de estrategias de selección genómica en el mejoramiento híbrido de Eucalyptus” financiado por ANII (FMV_3_2022_1_172462) del cual participa la Facultad de Agronomía (UDELAR), INIA y UPM Forestal Oriental.

Agradecer también a Ana Paula Coelho, por brindarnos la oportunidad de realizar el trabajo final de grado y permitirnos que éste salga adelante, por sus enseñanzas aportadas, por su paciencia, por su confianza y motivación durante este proceso. Además, el agradecimiento a Marianella Quezada quien nos guio y ayudo en el proceso de la realización del trabajo. Por último, agradecer al grupo disciplinario de Anatomía de la Madera, al Laboratorio de Suelos y Aguas y a las funcionarias de Biblioteca Montevideo por su tiempo, disposición y amabilidad.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	6
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivo general	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Descripción de las especies.....	12
2.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden.....	12
2.1.2 <i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden.....	14
2.2 Antecedentes de uso y situación actual de <i>Eucalyptus grandis</i> y <i>Eucalyptus dunnii</i> en Uruguay	16
2.3 Hibridación en el Mejoramiento Genético.....	17
2.3.1 Híbridos artificiales	17
2.3.2 Vigor híbrido – Heterosis	18
2.4 Composición química de la madera	18
2.4.1 Generalidades	18
2.4.2 Celulosa	19
2.4.3 Hemicelulosa.....	20
2.4.4 Lignina.....	20
2.4.5 Extractivos.....	22
2.5 Generalidades del pulpeo químico.....	23
2.5.1 Pulpaje químico	23

2.5.2	Proceso Kraft.....	23
2.5.3	Reacción de la lignina en el proceso Kraft	25
2.5.4	Reacción de la celulosa y la hemicelulosa en el proceso Kraft	26
2.5.5	Efecto de los extractivos en el proceso Kraft	26
2.6	Valores de referencia de componentes químicos en <i>Eucalyptus grandis</i> y <i>Eucalyptus dunnii</i>	27
2.7	Calcio	28
2.8	Valores de referencia de calcio en <i>Eucalyptus spp.</i>	29
2.9	Efecto del calcio en la cocción Kraft.....	29
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1	Material Vegetal.....	32
3.2	Determinación de contenido de extractivos.....	33
3.3	Determinación de contenido de calcio	35
3.4	Determinación de contenido de cenizas.....	38
3.5	Análisis Estadístico	38
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1	Análisis descriptivo general de las variables medidas.	40
4.2	Contenido de calcio	41
4.3	Porcentaje de extractivos.....	45
4.4	Porcentaje de cenizas.....	49
4.5	Correlaciones	52
5	CONCLUSIONES	54
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.

Tabla 1 Composición química de la madera de <i>E. grandis</i> según edad y lugar de plantación	27
Tabla 2 Composición química de la madera de <i>E. dunnii</i> según edad y lugar de plantación	28
Tabla 3 Contenido de calcio para especies de <i>Eucalyptus</i> , considerando la edad de la plantación	29
Tabla 4 Distribución de individuos por cruzamiento, ensayo y familia	32
Tabla 5 Parámetros de posición y dispersión de las variables contenido de extractivo, calcio y cenizas	40
Tabla 6 Ranking de familias establecido por el contenido de calcio	43
Tabla 7 Ranking de familias establecido por el contenido de extractivos	47
Tabla 8 Ranking de familias establecido por el contenido de cenizas	51
Tabla 9 Correlaciones entre variables rendimiento pulpable y densidad básica con porcentaje de extractivos, calcio y cenizas.....	52

Figura No.

Figura 1 Distribución natural de <i>Eucalyptus grandis</i>	12
Figura 2 Ilustración de ramas, hojas jóvenes y adultas, botón floral y fruto de <i>Eucalyptus grandis</i>	14
Figura 3 Distribución natural de <i>Eucalyptus dunnii</i>	15
Figura 4 Ilustración de ramas, hojas jóvenes y adultas, botón floral y fruto de <i>Eucalyptus dunnii</i>	16
Figura 5 Estructura química de la celulosa	19
Figura 6 Estructura química de la Hemicelulosa.....	20
Figura 7 Estructura de la Lignina	22
Figura 8 Muestras de madera (discos) sin procesar y procesadas en molino eléctrico .	33
Figura 9 Cartuchos con muestras de madera molida (izquierda). Soxhlet con cartuchos en el interior (derecha)	34
Figura 10 Muestras en estufa para su secado	35

Figura 11 Crisoles con muestras de madera molida para ser quemados en plancha eléctrica	36
Figura 12 Mufla con crisoles con material vegetal para la obtención de cenizas	36
Figura 13 Crisoles con cenizas de las muestras.....	37
Figura 14 Filtrado y almacenado de las muestras en frascos esterilizados	37
Figura 15 Pesado de cenizas de las muestras	38
Figura 16 Parámetros descriptivos para la variable calcio por ensayo	41
Figura 17 Parámetros descriptivos para la variable calcio por cruzamiento.....	42
Figura 18 Dendograma de familias híbridas entre <i>Eucalyptus grandis</i> y <i>Eucalyptus dunnii</i> para el contenido de calcio	44
Figura 19 Parámetros descriptivos para la variable extractivos por ensayo	45
Figura 20 Parámetros descriptivos para la variable extractivos por cruzamiento	46
Figura 21 Dendograma de familias híbridas entre <i>Eucalyptus grandis</i> y <i>Eucalyptus dunnii</i> para el contenido de extractivos.....	48
Figura 22 Parámetros descriptivos para la variable cenizas por ensayo	49
Figura 23 Parámetros descriptivos para la variable cenizas por cruzamiento.....	49

RESUMEN

En Uruguay, *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* son clave en la producción de pulpa de celulosa. Este trabajo se centró en la caracterización química de la madera de híbridos interespecíficos entre estas especies, con el objetivo de evaluar su potencial para la producción de pulpa de celulosa. Se recolectaron 198 muestras de madera provenientes de 29 familias, distribuidas en dos ensayos que involucraron dos cruzamientos: *E. dunnii* x *E. grandis* y *E. grandis* x *E. dunnii*. Se realizaron análisis químicos para determinar el contenido de extractivos, calcio y cenizas. El contenido de extractivos fue determinado utilizando un equipo Soxhlet con etanol como solvente, mientras que el contenido de calcio y cenizas se obtuvo mediante digestión en mufla a 500 °C. Para estas variables se realizó un análisis descriptivo, seguido por la aplicación de modelos lineales para evaluar el efecto de factores como familia, cruzamiento y ensayo. Posteriormente, se realizaron pruebas de Tukey para comparar medias y se realizaron análisis de correlación de Pearson entre estas variables y variables de calidad de madera: rendimiento pulpable y densidad básica. Se observaron diferencias significativas solamente entre tipo de cruzamientos para las variables calcio y cenizas, y para extractivos ningún efecto fue significativo. Adicionalmente se realizaron rankings por familia para identificar las mejores y peores familias para estos parámetros químicos. Como resultado para el contenido de calcio y ceniza, los híbridos donde *E. dunnii* fue utilizado como madre presentaron mayores contenidos, mientras que los híbridos donde *E. grandis* fue la madre mostraron niveles más bajos. En el análisis de estos datos para el caso de extractivos, se observó una leve relación con el tipo de cruzamiento, donde *E. dunnii* x *E. grandis* tiende a concentrarse en niveles más bajos e intermedios, mientras que *E. grandis* x *E. dunnii* muestra una mayor proporción de familias con niveles altos. La correlación, entre el rendimiento pulpable y el contenido de extractivos fue negativa (-0,27), mientras que la correlación entre esta misma variable y el contenido de calcio fue de 0,18, indicando una relación débil.

Palabras Clave: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, híbridos interespecíficos, propiedades químicas, producción de pulpa

ABSTRACT

In Uruguay, *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* are key species in pulp production. This study focused on the chemical characterization of wood from interspecific hybrids between these species to assess their suitability for pulp production. A total of 198 wood samples were collected from 29 families distributed across two trials, involving two cross types: *E. dunnii* x *E. grandis* and *E. grandis* x *E. dunnii*. Several chemical analyses were conducted to determine the content of extractives, calcium, ash, and moisture. Extractive content was measured using a Soxhlet apparatus with ethanol as the solvent, while calcium and ash content were determined through muffle furnace digestion at 500 °C. Descriptive analyses were performed for these variables, followed by the application of linear models to evaluate the effects of factors such as family, cross type, and trial on the chemical parameters. Tukey's tests were applied to compare means, and Pearson correlation analyses were conducted between these variables and wood quality traits, including pulp yield and basic density. Significant differences were found only between cross types for calcium and ash content. Rankings by family were created to select the best families for these parameters, revealing that hybrids with *E. dunnii* as the maternal parent exhibited higher calcium and ash contents, while hybrids with *E. grandis* as the maternal parent showed lower levels. Although no significant effects were found for extractives, rankings by family were also performed. The data analysis suggested a potential relationship between cross type and extractive content, where *E. dunnii* x *E. grandis* hybrids tended to cluster around lower and intermediate levels, while *E. grandis* x *E. dunnii* hybrids showed a higher proportion of families with elevated levels. The correlation between pulp yield and extractive content was negative (-0,27). Conversely, the correlation between pulp yield and calcium content was 0,18, indicating a weak relationship.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, interspecific hybrids, chemical properties, pulp production

1. INTRODUCCIÓN

La industria forestal en Uruguay ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, con un enfoque especial en el cultivo de especies de rápido crecimiento como los eucaliptos (Dirección General Forestal [DGF], 2021). Entre las especies más relevantes se encuentran *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*, que han sido ampliamente utilizadas en plantaciones comerciales debido a su rápida tasa de crecimiento y capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, a pesar de sus características favorables, estas especies también presentan desafíos relacionados con la resistencia a factores ambientales y la calidad de la madera producida.

Para mejorar las características de la madera destinada a la producción de pulpa, se ha recurrido a la hibridación interespecífica entre diversas especies de eucaliptos con el objetivo de combinar las ventajas de ambas especies en un solo híbrido. En este contexto, el presente trabajo se centra en la caracterización química de la madera de híbridos interespecíficos entre *E. grandis* y *E. dunnii*, con el propósito de evaluar sus atributos para la producción de pulpa. Se busca, particularmente, determinar los contenidos de extractivos, calcio, cenizas y correlacionar estos parámetros con el rendimiento pulpable y la densidad básica, lo cual permitirá obtener información del efecto de estos componentes de la madera en la calidad pulpable y además una visión más clara sobre el potencial de estos híbridos en la industria papelera.

El estudio comprende un análisis detallado de la composición química de la madera de 198 individuos correspondientes a 29 familias de híbridos, provenientes de dos ensayos que incluyen los cruzamientos *E. dunnii* × *E. grandis* y *E. grandis* × *E. dunnii*. Los resultados de esta investigación contribuyen a un mayor conocimiento sobre las propiedades químicas de estos híbridos, y la influencia de los diferentes cruzamiento y ensayos, ofreciendo información valiosa para la selección de material genético adecuado en programas de mejoramiento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Estudiar la composición química de la madera de híbridos interespecíficos entre *E. grandis* y *E. dunnii* y evaluar sus atributos para la producción de pulpa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar el contenido de extractivos de la madera de híbridos interespecíficos entre *E. grandis* y *E. dunnii*.
- Determinar el contenido de calcio y cenizas de la madera de híbridos interespecíficos entre *E. grandis* y *E. dunnii*.
- Correlacionar los contenidos de extractivos, calcio y cenizas con rendimiento pulpable y densidad básica.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descripción de las especies

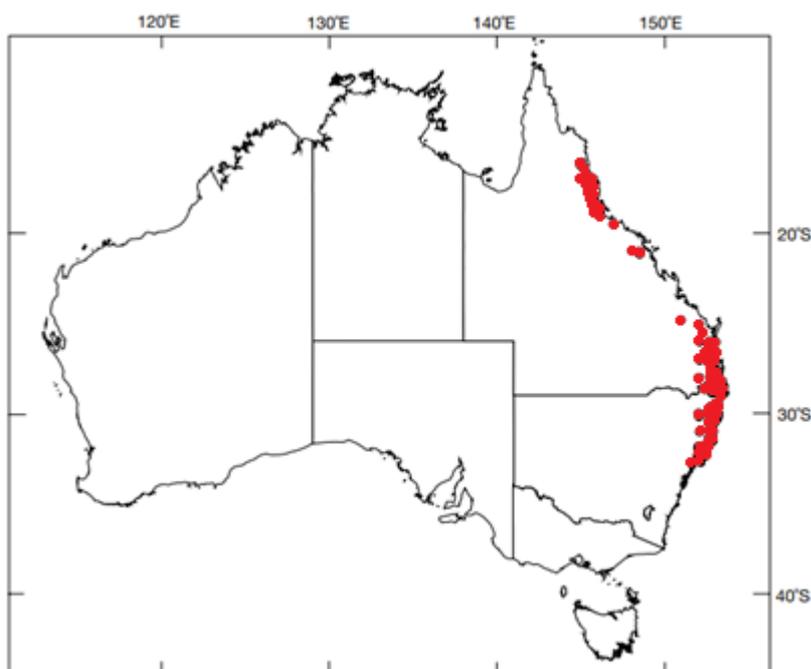
2.1.1 *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden

Conocido con el nombre común “Eucalipto”, “Rose Gum” o “Flooded Gum”, el *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, es una especie que se destaca por presentar árboles que pueden alcanzar hasta 75 metros de altura y diámetros de más de tres metros. Se encuentra principalmente en la costa este de Australia, en altitudes desde el nivel del mar hasta los 600 metros (Figura 1) (Boland et al., 2006).

Estas áreas de distribución natural se caracterizan por presentar temperaturas medias de 24-30°C en verano y 3-8°C en invierno, baja incidencia de heladas y una precipitación anual que varía de 1.000 a 3.500 mm. Prefiere suelos profundos y fértiles de origen aluvial o volcánico, y se encuentra comúnmente en bosques altos abiertos (Boland et al., 2006).

Figura 1

Distribución natural de Eucalyptus grandis



Nota. Tomado de Boland et al. (2006).

Esta especie se caracteriza por presentar individuos de gran porte, de tronco recto y buen desrame natural, follaje de textura media a gruesa, corteza caduca en fajas largas y

persistente escamosa en la base (1-3 m) con ritidoma gris verdoso a gris blanquecino (Brussa, 1994).

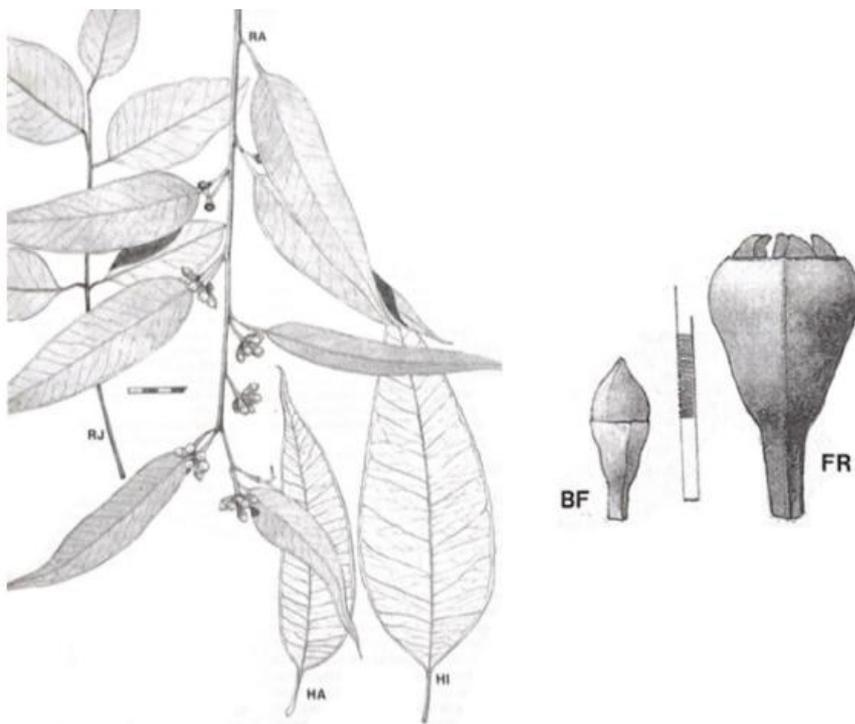
Presenta hojas de color verde oscuro y muy discoloras, que varían su morfología según la etapa de crecimiento. Las primeras son ovales y opuestas, las juveniles pecioladas (1-2 cm), alternas, ovales de ápice agudo, base redondeada (6-12 x 5-9 cm). Las intermedias son alternas, pecioladas (2-2,5 cm) oval-lanceoladas con ápice agudo, acuminado, de base cuneada (14-18 x 3-6 cm), finalmente las adultas son pecioladas (2-2,8 cm), alternas, lanceoladas, con ápice agudo, acuminado, de base cuneada (10-18 x 2-3.5 cm) y nervaduras secundarias transversales (Figura 2) (Brussa, 1994).

Las flores se agrupan de 7-11 en inflorescencias simples axilares sobre pedúnculos achatados, los botones florales son ovoides o globosos generalmente glaucos con pedicelos angulosos, el opérculo es cónico o rostrado de menor tamaño que el hipantio. La floración se produce a fines de verano y comienzo del otoño, existe una segunda floración a comienzos de primavera la cual es de menor magnitud que la anterior. Los frutos son piriformes (0,5-1,1 x 0,4-0,9 cm), presentan pedicelos cortos, disco plano, incluso, muy poco visible, presenta de 4-6 valvas exertas, curvas que convergen en el ápice a la madurez (Figura 2) (Brussa, 1994).

La madera presenta una albura de color rosado pálido, duramen de color rosado a rojo claro y densidades muy variables, abarcando desde los 545 hasta 955 kg/m³. Sus usos son muy variados, desde la construcción hasta la producción de pulpa de celulosa (Boland et al., 2006).

Figura 2

Ilustración de ramas, hojas jóvenes y adultas, botón floral y fruto de Eucalyptus grandis



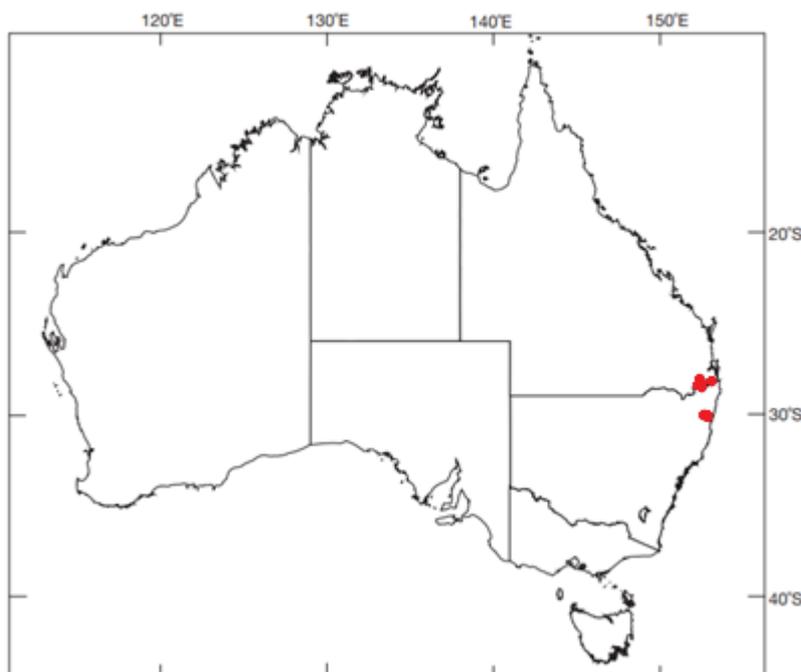
Nota. HA: Hoja adulta. HI: Hoja intermedia. RJ: Rama juvenil. RA: Rama adulta. BF: Botón floral. FR: Fruto. Adaptado de Brussa (1994).

2.1.2 *Eucalyptus dunnii* Maiden

El *Eucalyptus dunnii* Maiden es conocido con el nombre común “Eucalipto blanco” o “Dunn’s White Gum”, esta especie alcanza alturas de 50 metros y diámetro a la altura del pecho de 1 a 1,5 m, en condiciones de crecimiento más abiertas, presenta una copa muy extendida y ramificada (Boland et al., 2006).

En cuanto a su distribución natural es restringida al noreste de Nueva Gales del Sur y el sureste de Queensland (Figura 3) donde se presentan altitudes de 220 a 860 metros, temperaturas más calientes de 24° a 29° y las más frías de 2° a 5° con incidencia moderada de heladas, y un régimen de precipitaciones de 1.000 mm a 1.600 mm anual, su ubicación es principalmente en el fondo de valles, laderas inferiores de colinas, como también en crestas altas de suelos basálticos alrededor de los bordes de las selvas tropicales, prefiriendo suelos húmedos y altamente fértiles (Boland et al., 2006).

Figura 3
Distribución natural de Eucalyptus dunnii



Nota. Tomado de Boland et al. (2006).

Esta especie presenta individuos de fuste recto, follaje denso y péndulo, corteza persistente en la base del tronco, escamosa, castaña grisácea y en el resto del fuste caduca en fajas largas, con ritidoma de color grisáceo a crema (Brussa, 1994). En cuanto a la morfología de las hojas, las primeras presentan filotaxia opuesta, las juveniles opuesta o subopuesta, pecioladas (0,5-1,5 cm) de forma oval a elíptica con ápice agudo mucronado, base cordada o redondeada, de color verde o netamente discoloras (4-10 x 3-7 cm). Las intermedias son pecioladas (2,5-3,5 cm) alternas, oval lanceoladas o ampliamente lanceoladas (12-30 x 4-6,5 cm), presentan ápice agudo acuminado, base redondeada a amplia cuneada, de color verde levemente discoloras. Las adultas son pecioladas (2-3 cm), alternas, lanceoladas de ápice agudo, acuminado y base cuneada, levemente discoloras a concoloras con nervaduras secundarias oblicuas y dimensiones de 10-20 x 2-4 cm (Figura 4) (Brussa, 1994).

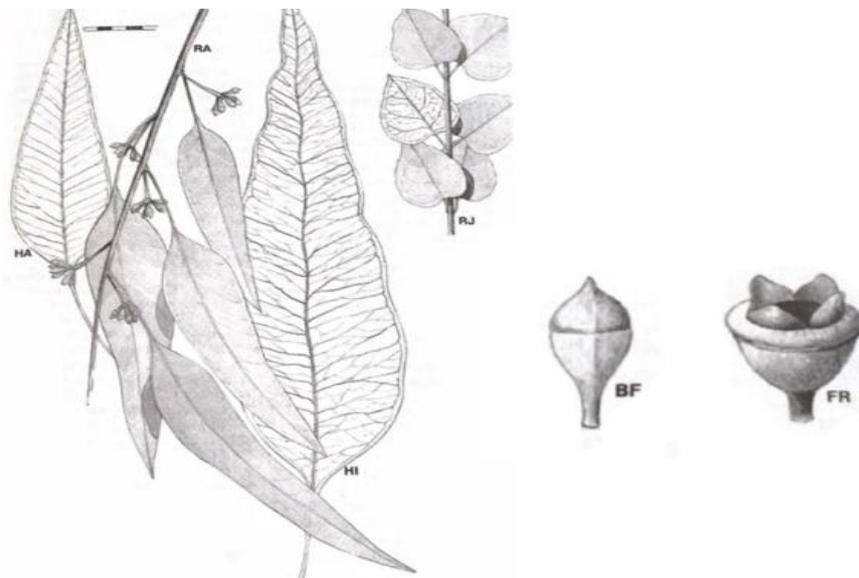
Presenta siete flores dispuestas en inflorescencias simples axilares, con pedúnculo achatados de 1,5-2 cm. Los botones florales son ovoides (0,7 x 0,3 cm), pedicelados (0,5 cm), angulosos, el opérculo es levemente rosado y más largo que el hipantio. Los frutos son hemisféricos con dimensiones de 0,6 x 0,6 cm, disco convexo, exserto y notorio,

presenta 3-4 valvas las cuales son salientes, anchas y fuertes (Figura 4). La floración ocurre a fines de primavera y en verano (Brussa, 1994).

Según Boland et al. (2006) su madera, presenta duramen blanquecino, marrón amarillento a marrón pálido, de grano grueso con una densidad de alrededor de 800 kg/m^3 , muy utilizada para fines de construcción y actualmente es demandada para fines pulpables.

Figura 4

Ilustración de ramas, hojas jóvenes y adultas, botón floral y fruto de *Eucalyptus dunnii*



Nota. HA: Hoja adulta. HI: Hoja intermedia. RJ: Rama juvenil. RA: Rama adulta. BF: Botón floral. FR: Fruto. Adaptado de Brussa (1994).

2.2 Antecedentes de uso y situación actual de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* en Uruguay

Según Brussa (1994), *Eucalyptus grandis* se difunde en Uruguay en la década del 60, posterior a que la especie fuera introducida en 1963 a partir de huertos semilleros de Sudáfrica; sin embargo, ya existían escasas plantaciones de esta especie en el departamento de San José y Rivera, a diferencia de *E. dunnii*, que los primeros cultivos comerciales datan de la década del 90.

La especie *E. dunnii* es considerada una especie más resistente al frío que *E. grandis*, sin embargo, esta última es uno de los cultivos más utilizados en plantaciones forestales comerciales, debido a su conformación y velocidad de crecimiento. Estas características pueden verse afectadas en suelos poco desarrollados y con drenaje imperfecto (Brussa, 1994).

Según DGF (2021), a nivel nacional actualmente existe una superficie de bosque plantado de 1.087.109 ha, lo cual representa un 6,21% de la superficie total del país. De estas, 216.581 hectáreas se encuentran plantadas con *E. dunnii* y 250.964 con *E. grandis*, representadas por bosques de más de 3 años. El área total de bosques menores a tres años es de 203.197, de las cuales no es posible discriminar las especies. Sin embargo, en base a encuestas de viveros realizadas en el período 2018-2021, se puede inferir que 49% de esta área es plantada con *E. dunnii* y 36% con *E. grandis*.

En cuanto a la distribución en el país de las plantaciones de *E. dunnii*, de la totalidad de hectáreas un 21-26% se encuentra en el departamento de Rio Negro, 16-21 % en el departamento de Paysandú, 10 a 16 % en el departamento de Durazno, 5 a 10 % en Tacuarembó, y el restante 5% en el resto del país. En lo que respecta a *E. grandis*, Rivera, Rio Negro, Cerro Largo y Paysandú presentan cada uno un 13 a 19 %, Tacuarembó, Durazno y Treinta y Tres 6 a 13 %. El restante 6% se distribuye en el resto del país (DGF, 2021).

2.3 Hibridación en el Mejoramiento Genético

El término híbrido, generalmente se refiere a cruzamientos de individuos pertenecientes a diferentes especies, denominados específicamente híbridos interespecíficos. Este tipo de hibridación suele usarse para cruzar especies las que naturalmente no podrían cruzarse. Sin embargo, el término híbrido puede referirse a la cruce de individuos perteneciente a una misma especie, estos se denominan híbridos intraespecíficos (Zobel & Talbert, 1994).

El objetivo de la hibridación es que los individuos resultantes de la cruce combinen en ellos características heredadas de ambos progenitores, pero estas características heredadas no serán solamente las buenas, sino que también se pueden heredar las peores. Por lo tanto, si se desea que los híbridos produzcan mejores características, se deben seleccionar precisamente los mejores genotipos como progenitores (Zobel & Talbert, 1994).

2.3.1 Híbridos artificiales

Si bien los híbridos naturales pueden aplicarse en un programa de mejoramiento genético, esta cruce entre los parentales será al azar, por lo que, si se desean considerar seriamente híbridos en un programa de mejoramiento genético forestal, se deben realizar híbridos artificiales a partir de individuos adecuados y previamente seleccionados de las especies

parentales deseadas. Este tipo de hibridación permite producir genotipos que incorporen características deseables de dos especies o de dos individuos en un individuo o un grupo de estos (Diller & Clapper, 1962 como se cita en Zobel & Talbert, 1994).

2.3.2 Vigor híbrido – Heterosis

Snyder (1972) menciona que la heterosis se trata de una superioridad del híbrido en relación con la media de ambos progenitores. Zobel y Talbert (1994) definen al vigor híbrido como una superioridad en tamaño del híbrido con respecto a ambos progenitores, pero mencionan que es fundamental comprender que este término también se puede utilizar para definir otras características y no solamente está relacionada al tamaño.

Griffiths et al. (2008) en una definición más actual, menciona que en casos en los que se unen dos líneas dispares de plantas o animales en una F1 híbrida, el híbrido resultante de la cruce muestra una superioridad en cuanto a fenotipo y vigor con relación a ambos progenitores, esta superioridad es lo que se define como vigor híbrido, además este autor afirma que el fenómeno es innegable y ha aportado grandes contribuciones a la agricultura.

2.4 Composición química de la madera

2.4.1 Generalidades

La madera, dada su compleja diversidad en términos de anatomía, estructura y procesos de descomposición, presenta características físicas y químicas específicas. Esta heterogeneidad se manifiesta claramente a través de la observación visual, el examen microscópico y el análisis químico de las macromoléculas constitutivas de la pared celular. Estos factores hacen que la definición química exacta de la madera sea un desafío considerable (Pandero, 2010).

Según Ibáñez et al. (2009) entre los componentes clave de la madera se encuentran la celulosa comprendiendo alrededor del 40-50% del peso seco en coníferas y latifoliadas, las hemicelulosas representando aproximadamente el 25% en coníferas y 15 a 35% en latifoliadas, la lignina constituyendo cerca del 15-35% en coníferas y 17 a 25% en latifoliadas y un grupo de sustancias solubles en solventes conocidos como extractivos los cuales representan menos de 10%, todos los porcentajes representados en base al peso

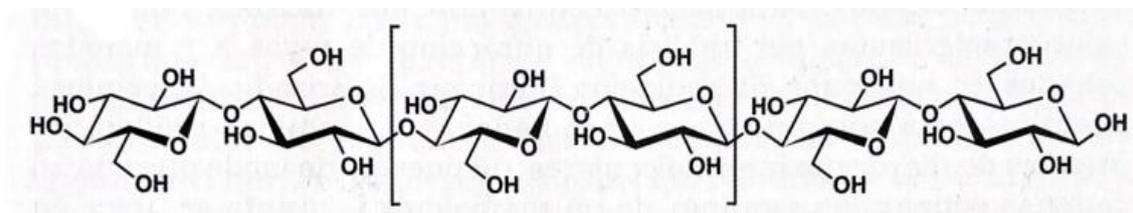
seco. Estos elementos contribuyen a la complejidad química y estructural de la madera, dificultando la tarea de una definición química precisa (Ibáñez et al., 2009).

2.4.2 Celulosa

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza y es el principal constituyente de la madera, localizándose principalmente en la pared secundaria de la pared celular (Pandero, 2010). Según Smook (2019) es un hidrato de carbono compuesto por carbono, hidrogeno y oxígeno. En cuanto a su estructura molecular, consiste en un homopolisacárido constituido por unidades de β -D-glucopiranosas unidas entre sí por enlaces glucosídicos (1-4) (Figura 5) (Pandero, 2010; Rowell et al., 2012)

Figura 5

Estructura química de la celulosa



Nota. Tomado de Ibáñez et al. (2009).

La celulosa consiste en moléculas lineales formada por unidades de celobiosa, las cuales están unidas entre sí por enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van Der Waals; estas unidades de celobiosa se encuentran en un número variable entre 7000 a 13000 (Vignote & Martínez, 2006). La molécula de celulosa presenta una longitud de 5 micras y se organizan en agregados llamados microfibrillas, las cuales tienen regiones altamente ordenadas, conocidas como cristalinas, y regiones menos organizadas, denominadas amorfas (Vignote & Martínez, 2006).

Según Pandero (2010), la fórmula básica de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_x$, presentando un peso molecular de 162 g/mol. El término 'x' representa el grado de polimerización, siendo "x" un valor grande y muy variable dependiendo de los métodos utilizados para su determinación y sus orígenes. La celulosa es esencialmente un polímero de glucosa anhidra, lo que significa que se forma por la condensación de glucosa con la pérdida de agua. Siau (1984) menciona que el grado de polimerización en promedio ronda en los 10.000 en la pared secundaria y en la pared primaria oscila entre 2.000 y 4.000.

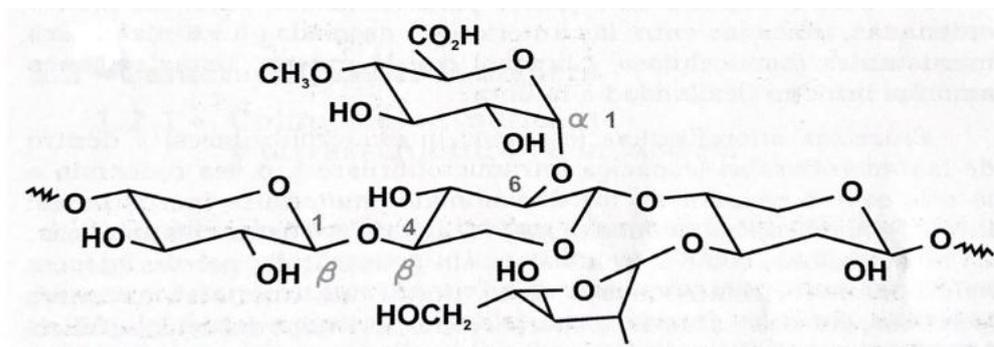
2.4.3 Hemicelulosa

Las hemicelulosas son heteropolisacáridos por estar constituidos por varios tipos de monosacáridos. A diferencia de la celulosa, que está constituido solamente por glucosa, las hemicelulosas están compuestas por dos tipos de azúcares, las hexosas y las pentosas (Smook, 2019). Según Area (2008) en las hexosas encontramos glucosa, manosa y galactosa, y en las pentosas, a la xilosa y arabinosa. Estos polisacáridos, se caracterizan por ser ramificados, amorfos (Figura 6), solubles en agua (Area, 2008) y según Vignote y Martínez (2006) presentan un menor grado de polimerización con respecto a la celulosa, siendo este valor entre 70 a 200 unidades.

Este compuesto está asociado a la celulosa en los tejidos vegetales, actuando como matriz de soporte para las microfibrillas de esta, como también puede estar asociado a la lignina. Los contenidos de hemicelulosa en las células vegetales varían entre 25% - 35%, aunque este valor puede variar entre grupos, siendo generalmente menor en coníferas que en frondosas (Area, 2008). Otro aspecto el cual varía entre grupos es su naturaleza; en frondosas predominan los glucuronoxilanos, los cuales son homopolímeros compuestos por unidades de xilosa con cadenas laterales de ácido metil glucurónico. A diferencia de frondosas, en coníferas son más frecuentes los galactoglucomananos, polímeros 1,4 de glucosa y manosa (Eaton & Hale, 1993).

Figura 6

Estructura química de la Hemicelulosa



Nota. Tomado de Ibáñez et al. (2009).

2.4.4 Lignina

Al igual que la celulosa y hemicelulosa, es uno de los principales componentes de la madera, representando alrededor de 15 a 35 % de su peso seco, y se encuentra en gran abundancia en la naturaleza ocupando el segundo lugar después de la celulosa (Smook,

2019). Según Panderó (2010) la lignina se ubica en los espacios intercelulares y en las paredes celulares del xilema, y el proceso de lignificación ocurre cuando gran parte de la celulosa y hemicelulosa son depositadas.

La lignina es un polímero tridimensional fenólico compuesto por unidades de fenilpropano, que se unen mediante enlaces carbono-carbono (C-C) y éter (C-O-C), formando una estructura amorfa reticulada tridimensional (Figura 7) (Camero, 1992, como se cita en Area, 2008). La naturaleza aromática de los fenoles le confiere capacidad hidrofóbica a la lignina, mientras que su red tridimensional proporciona rigidez a la pared celular, permitiendo resistir fuerzas de compresión (Thomas 1981, como se cita en Area, 2008).

La resistencia a la compresión longitudinal de la madera se debe a dos factores principales: el contenido de lignina y al ángulo de inclinación de las microfibrillas en la capa S2. Como fue mencionado, la lignina proporciona rigidez y resistencia estructural a la madera mientras que el ángulo de inclinación de las microfibrillas de la capa S2 contribuye a distribuir y resistir las fuerzas de compresión aplicadas a lo largo de la dirección de la fibra (Siau, 1984).

En cuanto al núcleo aromático de la lignina, existen diferencias entre coníferas y latifoliadas. La mayoría de las coníferas poseen lignina del tipo guayacil, la cual está constituida por unidades de fenilpropano, con un oxígeno fenólico y un grupo metil (Thomas, 1981, como se cita en Area, 2008; Tsoumis, 1991). En cambio, la lignina de latifoliadas está formada por unidades de guayacil y unidades de siringil, ambas en cantidades aproximadamente iguales (Higuchi, 1990).

Según Otero (1988) los principales grupos funcionales encontrados en la lignina son los siguientes:

- a) Grupos metoxil ($-\text{OCH}_3$). Es el grupo funcional más característico de la lignina (coníferas 16%, latifoliadas 22%).
- b) Grupos hidroxilo ($-\text{OH}$). Son de naturaleza variada, es decir, fenólicos, alifáticos primarios, secundarios y terciarios. El contenido de estos grupos es de aproximadamente 10%, tanto para coníferas como para latifoliadas.
- c) Grupos carbonil y carboxil.
- d) Grupos éter ($\text{R}-\text{O}-\text{R}$), los cuales pueden ser aromáticos o alifáticos.

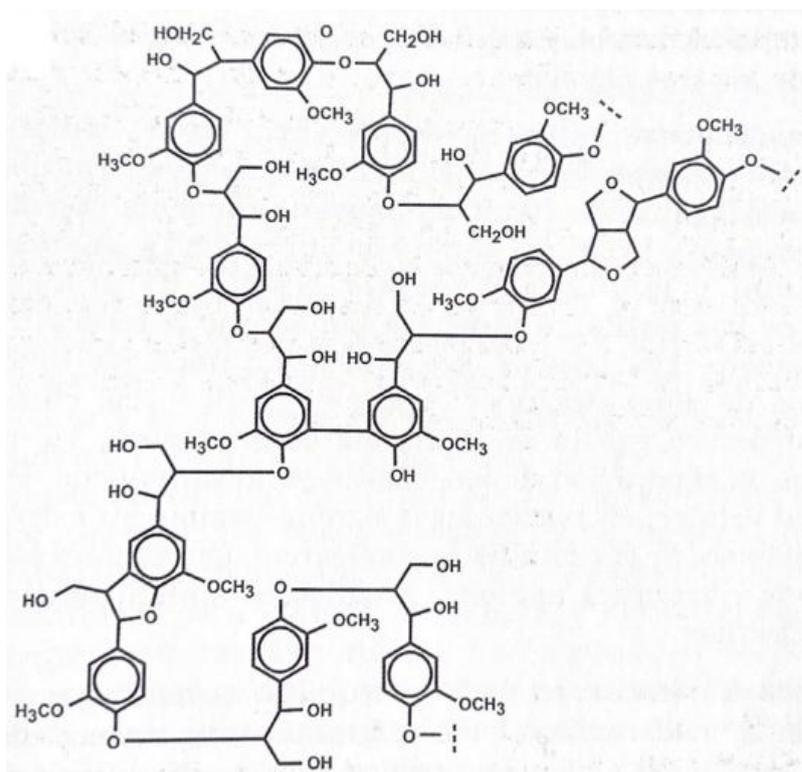
e) Enlaces dobles ($-C=C-$).

f) Grupos ésteres ($-C-O-R$), que se pueden presentar en algunas latifoliadas.

Según Pandero (2010) las proporciones de lignina depositada varían entre grupos. En coníferas, 60-70% es depositada en la lámina media, para así cumplir función estructural, y un 30% se deposita ordenando la celulosa y hemicelulosa en la pared secundaria. En frondosas, un 80-90% de la lignina se localiza en la lámina media y lo restante en la pared secundaria.

Figura 7

Estructura de la Lignina



Nota. Tomado de Ibáñez et al. (2009).

2.4.5 Extractivos

Son compuestos no estructurales de diversa naturaleza química, casi exclusivamente extracelulares, presentan bajo peso molecular. Varían los contenidos y su ubicación si se comparan diferentes especies, individuos dentro de la misma especie o en diferentes partes de un mismo individuo (Ibáñez et al., 2009). El término extractivo refiere a su facilidad parcial de extracción mediante el uso de solventes como agua fría o caliente, alcohol, benceno, acetona o éter (Ibáñez et al., 2009).

Los contenidos de extractivos, con respecto al peso seco de la albura, pueden ser de aproximadamente 1% o menos, mientras que, en duramen, pueden ser de 20% o más de su peso seco. En general, los extractivos constituyen un porcentaje muy pequeño del peso seco de la madera (Wilson & White, 1986, como se cita en Area, 2008).

Los extractivos encontrados tanto en coníferas como en latifoliadas, son terpenos y sus derivados, grasas, ceras y sus componentes y fenoles (fenoles simples, ligninas y quinonas). Además, en latifoliadas se puede encontrar aminoácidos, azúcares solubles y alcaloides (Otero, 1988). Estos componentes influyen ampliamente en muchas propiedades de la madera como los olores, colores típicos y sabores. Además, pueden actuar como agentes tóxicos evitando así el ataque de microorganismos, hongos, insectos y taladradores marinos, confiriéndole gran importancia a la resistencia de la madera (Area, 2008).

2.5 Generalidades del pulpeo químico

2.5.1 Pulpaje químico

Este método de pulpeo consiste en la integración de la madera, material insumo para la producción de la pulpa, con determinados productos químicos añadidos a una solución acuosa, a temperatura y presión elevadas, cuyo objetivo es degradar y disolver la lignina (Smook, 2019). Debido a que en este proceso también se degradan hemicelulosas y parte de la celulosa los rendimientos son menores en comparación con otros métodos como el mecánico, aproximadamente de 40% a 50 % con respecto a la cantidad de madera original (Smook, 2019).

Según Shmulsky y Jones (2011) el pulpeo químico es el método de despulpado más utilizado en todo el mundo. Este proceso presenta dos métodos principales, el proceso Kraft, el cual es un proceso alcalino, y el proceso al sulfito que es un proceso ácido (Shmulsky & Jones, 2011).

2.5.2 Proceso Kraft

Este proceso consiste en una cocción o digestión de la madera, la cual está previamente chipeada. Para el proceso de cocción se utiliza un licor blanco, el cual contiene hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) (Smook, 2019). Según Shmulsky y Jones (2011), el ataque alcalino rompe las moléculas de lignina en segmentos más pequeños los

cuales forman sales de sodio que son solubles en el licor de cocción. De acuerdo con Smook (2019), la lignina que es solubilizada y eliminada en el proceso de cocción típico de una pulpa para blanquear es de aproximadamente 80% a 90%, sin embargo, los carbohidratos también son atacados químicamente, eliminando así del 80% al 90% de las hemicelulosas, 10% de la celulosa y el 100% de los extractivos.

El trabajo de Ek et al. (2009) menciona que ningún método químico de despulpado es capaz de eliminar por completo la lignina, de lo contrario si lo hiciera, dañaría gravemente gran parte de los carbohidratos, como la celulosa, y esto es un efecto no deseado. Por tanto, la deslignificación finaliza manteniendo un pequeño porcentaje de lignina en la pulpa. La cantidad de lignina residual se estima determinando el número kappa.

Según Sixta et al. (2006), para mantener altos rendimientos y calidad de la pulpa, el proceso se limita a un cierto grado de deslignificación, teniendo como objetivos números kappa de 25 a 30 para pulpas kraft producidas con maderas de coníferas y valores de 15 a 20 cuando se produce pulpa kraft a partir de latifoliadas.

Según Smook (2019) el proceso de digestión puede ser continuo o discontinuo. En el proceso de digestión discontinuo, se introducen las astillas o chips en el digestor, con suficiente licor blanco como para cubrirlos por completo; esto comienza a tomar temperatura mediante circulación forzada del licor a través de un intercambiador de calor. El aire y otros gases no condensables presentes se expulsan a través de válvulas de control de presión, las cuales se encuentran en la parte superior del digestor; al cabo de una hora a hora y media se alcanza la temperatura de cocción deseada, y este tiempo además es el suficiente para que el licor impregne por completo y de manera uniforme las astillas. La cocción se mantiene por un periodo de hasta dos horas en la temperatura de cocción, la cual ronda en los 170 grados. Luego de la cocción o digestión, el contenido sale a un tanque de soplado donde las astillas ablandadas en la cocción se desintegran en fibras.

En el proceso de digestión continuo, las astillas o chips se transportan primero a través de un vaporizador, el cual depura el aire y otros gases no condensables; luego esas astillas precalentadas ingresan a un digestor continuo, mezclados con el licor blanco, pasando por una zona de temperaturas intermedias (115 - 120 grados). Esto se realiza para que los químicos penetren en las astillas de manera uniforme.

Posteriormente, en el transporte de las astillas dentro del digestor, la temperatura se eleva hasta los 170 grados y se mantiene por una hora a hora y media al igual que en el proceso

discontinuo para realizar la cocción. Ya ocurrida la digestión, la pulpa pasa a otra zona donde se le extrae el licor residual caliente y se deja enfriar a una temperatura menor a 100 grados con un licor frío para que no sufra daños mecánicos (Smook, 2019).

Este paso de separación de la pulpa y el licor residual es un proceso controlado denominado lavado de la pulpa cruda. El método más común de lavado es mediante el uso de lavadores por vacío a contracorriente o de tambores a presión para desplazar el licor con la mínima dilución. Finalmente, la pulpa se tamiza y se limpia (Smook, 2019).

Luego del proceso de deslignificación se obtiene un licor negro, el cual es conducido a una línea de recuperación; este licor consiste en los productos de la reacción de solubilidad de la lignina, el resto del material orgánico disuelto y los productos químicos utilizados en la cocción. A este se le realiza un tratamiento que consiste en una serie de pasos con el fin de recuperar las sustancias químicas de cocción y regenerar el licor blanco (Ek et al., 2009).

2.5.3 Reacción de la lignina en el proceso Kraft

Uno de los objetivos principales del proceso Kraft es la eliminación de la lignina, para así separar las fibras y obtener una pulpa con un bajo contenido de este polímero. Según Smook (2019), el proceso de deslignificación se puede dividir en tres fases: la primera fase la define como un proceso de extracción, la segunda como deslignificación de la madera y la tercera como una deslignificación residual, culminando así el proceso cuando la lignina alcanza valores de 3% para latifoliadas.

Sixta et al. (2006) define a las tres etapas como inicial, masiva y residual o final. En la primera etapa ocurre la ruptura de los enlaces α -arilo éter y β -arilo éter en las unidades fenólicas de la lignina, representando aproximadamente un 15 a 25% de la lignina nativa, en esta etapa es también donde se observa la mayor pérdida de los carbohidratos como celulosa y hemicelulosas. En la segunda etapa, se observa la mayor eliminación de la lignina, mientras que la reducción en los carbohidratos no es tan importante como en la etapa anterior. En la tercer y última etapa, se continúa eliminando lignina, pero solamente se elimina 10 a 15 % de la misma y, si la deslignificación se mantiene continua, aumenta la disolución de los carbohidratos.

2.5.4 Reacción de la celulosa y la hemicelulosa en el proceso Kraft

En cuanto a las reacciones que le ocurren a la celulosa y hemicelulosa en el proceso de pulpeo kraft, estas se encuentran superpuestas con la reacción de la lignina, es decir que están ocurriendo en simultáneo. Las pérdidas de los carbohidratos se producen debido a reacciones llamadas “*Peeling*”; en esta reacción, los enlaces de cadena éter, es decir, los enlaces reductores de los grupos terminales son vulnerables al ataque químico, produciendo así la eliminación de la unidad que se encuentra en el extremo terminal. La degradación de la celulosa es mínima debido al largo de su cadena, que ronda en las 10 mil unidades de glucosa, y su estructura cristalina la cual reduce la accesibilidad al ataque; mientras que la degradación de la hemicelulosa es más importante debido a la menor longitud de su cadena, aproximadamente 150 unidades de azúcar y su estructura amorfa, la cual aumenta la accesibilidad al ataque, disminuyendo así 40 a 50 % de su contenido en comparación con la reducción de la lignina la cual es aproximadamente de 20% (Smook, 2019).

2.5.5 Efecto de los extractivos en el proceso Kraft

Los extractivos en la madera generan múltiples problemas en la fabricación de pulpa kraft, impactando tanto el proceso productivo como la calidad del producto final. Según Hillis y Sumitomo (1989), uno de los principales problemas es la acumulación de brea en los equipos y en el papel. La brea es una sustancia resinosa y aceitosa que se ablanda y derrite con el calor, y que puede causar manchas y dificultades en la etapa de blanqueo debido a su liberación en el licor. Almeida y De Jesús (2001) agregan que un alto contenido de extractivos en la madera disminuye el rendimiento pulpable, ya que estos compuestos dificultan el acceso del licor de cocción a las células de la madera, lo que obliga a utilizar mayores cantidades de álcali, resultando en una mayor disolución de celulosa y hemicelulosas.

Sixta et al. (2006) señala que la disolución adecuada de los extractivos es crucial para evitar problemas de brea, que no solo afectan la calidad del papel, sino que también interfieren en la deslignificación al cubrir partes de la lignina o reducir la penetrabilidad de los productos químicos de cocción. Lehr et al. (2021) complementa esta idea, indicando que altos contenidos de extractivos pueden generar obstrucciones y adherencias

en los equipos, lo que reduce la eficiencia del proceso y aumenta los costos operativos y de mantenimiento, además de incrementar el riesgo de fallas mecánicas en el sistema.

2.6 Valores de referencia de componentes químicos en *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*

Según estudios de la composición química realizados por diversos autores para individuos de diferentes edades y sitios de plantación de las especies *E. grandis* y *E. dunnii* se obtuvieron valores para los contenidos de celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos y ceniza. Estos valores se presentan a continuación en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1

Composición química de la madera de E. grandis según edad y lugar de plantación

EDAD (Años)	CELULOSA	LIGNINA TOTAL	HOLOCELULOSA	CENIZA	EXTRACTIVOS	LUGAR DE PLANTACIÓN	Ref. *
10-25	-	27,22 %	68,69 %	-	4,08 %	Telêmaco Borba, Paraná, Brasil.	1
-	43,8 %	28,6 %	27,4 % hemicelulosa	0,43 %	3,01%	Corrientes	2
6-8	46%	16 %	-	-	3,083 %	Sudáfrica	3
8-10	45,97 % - 55,5 %	27,99 %	17,33 % hemicelulosa	0,31 % - 0,73 %	2,16 % - 8,08 %	Salta	4
15	-	31,65 %	54,12 % - 66,27 %	-	4,72 % - 8,96 %	Brasil	5
6	-	27,8 %	66,8 %	0,4 %	6,7 %	Lisboa, Portugal	6
MIN - MAX	40 % - 60 %	16 % - 31,65 %	54,12 % - 68,69 %	0,31 % - 0,73 %	2,16 % - 8,96 %	-	

Nota. Elaborado con base en ¹Silva et al. (2005), ²Núñez (2008), ³Klash et al. (2010), ⁴Leal et al. (2011), ⁵Zanuncio et al. (2014) y ⁶Neiva et al. (2015).

Tabla 2

Composición química de la madera de E. dunnii según edad y lugar de plantación

EDAD (Años)	CELULOSA	LIGNINA	HOLO CELULOSA	CENIZA	EXTRACTIVOS	LUGAR DE PLANTACIÓN	Ref. *
14	-	19,07 %	74,85 %	-	6,07 %	Colombo, Paraná, Brasil	1
6-8	44 %	13 %	-	-	3-6 %	Sudáfrica	2
10-15	38 % - 43 %	23,5 %	-	-	-	Uruguay	3
6	-	22,81 %	74,19 %	0,708 %	3-6 %	Sur de Brasil	4
MIN - MAX	38 % - 44 %	13 % - 23,5 %	74,19 % - 74,85 %	0,708 %	3 % - 6,07 %	-	-

Nota. Elaborado con base en ¹Pereira et al. (1999), ²Klash et al. (2010), ³Vegunta et al. (2022), ⁴Bonfatti et al. (2022).

2.7 Calcio

El calcio es un macronutriente esencial para las plantas superiores, que lleva a cabo funciones fisiológicas que influyen directamente en el desarrollo y funcionamiento de estas (Froom, 2010). Según Eklund y Eliasson (1990), desempeña un papel importante en la síntesis de las paredes celulares, específicamente en la laminilla media, debido a que forma las uniones entre las cadenas de pectina. White y Broadley (2003) mencionan que cumple un papel fundamental en el proceso de división celular, estabilizador de membrana y como segundo mensajero para respuestas a señales ambientales y hormonales.

La absorción del ion calcio se da de manera pasiva por raíces finas y es transportado por xilema hacia brotes y hojas por la fuerza motriz generada por la transpiración; este ion es inmóvil en el floema, por lo que luego de abandonar las células del xilema se debe depositar haciéndolo principalmente en las paredes celulares, esto hace que no esté disponible para procesos metabólicos (Froom, 2010). El exceso del ion calcio se puede acumular como cristales de oxalato de calcio en el floema o en los lúmenes de las células (Borchert, 1990).

Según McLaughlin y Wimmer (1999), el calcio tiene gran importancia en el proceso de lignificación de la pared celular, siendo así que bajas concentraciones de este ion se refleja en bajos contenidos de lignina; estos bajos contenidos de lignina pueden provocar un debilitamiento de la madera, haciendo que el xilema se vuelva más frágil y quebradizo.

2.8 Valores de referencia de calcio en *Eucalyptus spp.*

Aunque los trabajos de investigación sobre el contenido de calcio en especies de *Eucalyptus* son escasos, se presenta a continuación una tabla de referencia con los valores de contenido de este nutriente para diversas especies de *Eucalyptus*.

Tabla 3

Contenido de calcio para especies de Eucalyptus, considerando la edad de la plantación

ESPECIE	EDAD (Años)	CALCIO	Ref. *
<i>Eucalyptus spp.</i>	-	0,051 – 0,27 %	1
<i>Eucalyptus grandis</i>	10 - 12	0,13 – 0,17 %	2
<i>Eucalyptus grandis</i>	7	0,088 %	3
<i>Eucalyptus dunnii</i>	9	0,17 %	4
<i>Eucalyptus dunnii</i>	15	0,07 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	10	0,087 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	14	0,096 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	11	0,15 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	13	0,336 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	20	0,37 %	5
<i>Eucalyptus dunnii</i>	13	0,466 %	5
MIN - MAX		0,07 % - 0,46 %	

Nota. Elaborado con base en ¹Salmenoja et al. (s.f.). ²Giosa Casalongue (2009), ³Santos et al. (2015), ⁴Hernández et al. (2009), ⁵Vegunta (2023).

2.9 Efecto del calcio en la cocción Kraft

Según Foelkel (2011), el calcio que ingresa a la planta procedente de la madera se lo considera un elemento no procesable (NPE, de las siglas en inglés *non-processable element*), el cual no tiene una función operativa ni uso práctico en la industria, considerándolo un excedente e inadecuado para la fábrica; es uno de los elementos no procesados más abundante por su riqueza en la madera y corteza de eucaliptos. Otras fuentes de calcio que intervienen en el proceso Kraft son las provenientes de la dureza del agua industrial, por su alto consumo unitario y el calcio residual insoluble que no es eliminado completamente por decantación o filtrado del licor blanco (Foelkel, 2011).

Según Doldán et al. (2011), el calcio es un NPE muy insoluble en álcali y su acumulación puede generar problemas de incrustaciones en las superficies de transferencias de calor en el digestor y, además, en las superficies de calentamiento del evaporador y el apagador del equipo de lavado de blanqueo. Además, Foelkel (2011) menciona que el calcio residual que no es eliminado por decantación y filtrado del licor blanco puede causar problemas en los depuradores y los tanques de almacenamiento de este.

En cuanto al efecto del calcio en la deslignificación, Saltberg y Brelid (2009) llevaron a cabo un estudio utilizando madera de tres especies: eucalipto, álamo y abedul. El mismo consistió en realizar una cocción kraft a chips tratados previamente con diversos métodos para eliminar el calcio y comparar los valores kappa obtenidos con los de una cocción de chips testigos, es decir, sin un tratamiento previo. Los tratamientos realizados para la eliminación del calcio de los chips fueron lixiviación ácida, aplicación de un agente quelante DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético), aplicación de carbonato y tratamiento con oxalato. Luego de realizado el estudio se concluyó que, para maderas blandas como abedul y álamo, la eliminación previa del calcio tiene efecto en la deslignificación con todos los tratamientos, a excepción del realizado con oxalato, el cual arrojó un número kappa similar al de los chips testigos.

Finalmente, el estudio realizado en base a la cocción Kraft de madera de *Eucalyptus globulus*, arrojó valores kappa similares para la madera previamente tratada y sin tratar; estos valores se encontraron en un rango de 15 a 17, por lo cual el trabajo de Saltberg y Brelid (2009) concluyó que para esta especie el calcio no presenta un efecto significativo en la deslignificación, como sí ocurrió en las otras especies.

Sin embargo, un estudio más reciente sobre los efectos del calcio en la producción de pulpa kraft específicamente para la especie *Eucalyptus dunnii*, Vegunta (2023) en sus resultados menciona que el calcio tiene efecto negativo en varios parámetros del proceso. El primer efecto observado fue sobre la desfibrilación, siendo así que cuando el proceso fue realizado utilizando maderas con bajos contenidos de calcio (0,15 %) la desfibrilación fue adecuada, pudiendo realizarse en condiciones estándares de temperatura y presentando bajos niveles de rechazo. Sin embargo, cuando se realizó utilizando maderas con contenidos de calcio mayores (0,33 % y 0,46%) estas requirieron temperaturas más altas, y aun así no se llegó a una desfibrilación similar, presentando mayores niveles de rechazo.

Otro parámetro afectado por los contenidos de calcio es el tiempo de deslignificación, siendo este más bajo en maderas con menores contenidos del ion, este efecto es notorio en las primeras etapas del proceso. Además de los efectos ya mencionados se observó que un mayor contenido de calcio afecta negativamente el rendimiento de la pulpa, esto se debe a los mayores niveles de rechazo durante las etapas iniciales de fabricación (Vegunta, 2023).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material Vegetal

Las muestras de material vegetal fueron tomadas de dos ensayos de pruebas de progenie, que incluyen cruzamientos entre individuos de las especies *E. grandis* y *E. dunnii*. Los ensayos forman parte del programa de mejoramiento genético de la empresa UPM Forestal Oriental. En total se evaluaron 198 individuos: 107 provenientes del ensayo 1 y 91 del ensayo 2. El ensayo 1 se realizó en Young, Río Negro, sobre un suelo perteneciente al grupo CONEAT 9.1, mientras que el ensayo 2 se llevó a cabo en Quebracho, Paysandú, sobre un suelo perteneciente al grupo CONEAT 9.2. Estos individuos fueron seleccionados aleatoriamente del subconjunto del ensayo previamente seleccionado por parámetros de crecimiento (volumen). Dentro de cada ensayo, se detalla la cantidad de individuos para cada cruzamiento (Tabla 4). En ambos ensayos, predominan los individuos del cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis*, es decir *E. dunnii* utilizado como madre y *E. grandis* utilizado como padre, 78 individuos de este cruzamiento en el ensayo 1 y 55 individuos en el ensayo 2. Los individuos del cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* es decir *E. grandis* utilizado como madre y *E. dunnii* utilizado como padre, suman 29 en el ensayo 1 y 36 en el ensayo 2, totalizando 65 individuos para este cruzamiento. Las 198 muestras (individuos) estudiados provienen de 29 familias.

Tabla 4

Distribución de individuos por cruzamiento, ensayo y familia

	Ensayo 1	Ensayo 2	Total	Familias
<i>E. grandis</i> x <i>E. dunnii</i>	29	36	65	10
<i>E. dunnii</i> x <i>E. grandis</i>	78	55	133	19
Total	107	91	198	29
Familias	28	26	-	-

Nota. Se analizaron un total de 198 individuos pertenecientes a 29 familias.

De cada individuo, se contó con una muestra de disco tomada a la altura del pecho. A cada uno de estos discos se les extrajo previamente corteza y nudos, ya que son elementos que podrían interferir en la determinación de los contenidos químicos. Posteriormente los

discos fueron procesados en un molino eléctrico, donde se obtuvo una molienda con un tamaño de partícula de aproximadamente 1-2 mm (Figura 8).

Figura 8

Muestras de madera (discos) sin procesar y procesadas en molino eléctrico



3.2 Determinación de contenido de extractivos

Para esta determinación se secaron 3 gramos previamente molidos de cada muestra en estufa hasta alcanzar peso constante, se registró su peso seco y se colocaron en cartuchos de extracción realizados con papel de filtro. Estos cartuchos se procesaron en un Soxhlet (Figura 9), un equipo de extracción sólido-líquido que permite separar una fracción específica de la muestra utilizando un solvente. El Soxhlet realiza extracciones automáticas mediante un ciclo continuo en el que el solvente se evapora, condensa y precipita sobre la muestra logrando una extracción eficiente. En este caso, se utilizó 300 mL de etanol (ppa) como solvente. Se programó la manta calefactora a 79 °C ya que la temperatura de ebullición del etanol es de 78,37 °C, y cada ciclo de extracción se llevó a cabo por 6 horas a partir de que el etanol llega a su punto de ebullición.

Figura 9

Cartuchos con muestras de madera molida (izquierda). Soxhlet con cartuchos en el interior (derecha)



Para determinar el tiempo óptimo de extracción en Soxhlet se realizaron dos pruebas con 10 muestras cada una, y se hicieron dos extracciones, una por un periodo de tiempo de 6 horas y otra durante 12 horas. Las 20 muestras se pesaron previa y posteriormente a la extracción hasta llegar a peso constante. Como se obtuvo en ambos periodos de prueba la misma variación de peso, se concluyó que con ambos periodos se logra una extracción total de los extractivos orgánicos. Como resultado, fue posible disminuir los tiempos de extracción y todas las muestras fueron procesadas utilizando 6 horas de extracción.

Luego de procesadas las 198 muestras en Soxhlet, fueron extraídas de los cartuchos y colocadas en placas de Petri y se llevaron a estufa para su secado a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar peso constante (Figura 10). Este se alcanzó luego de 48 horas de secado. Posteriormente se pesaron y por diferencia de peso entre inicial y final se obtuvieron los contenidos de extractivos en gramo, que luego se convirtieron a porcentaje.

El peso constante se determinó pesando las muestras en periodos de tiempo sucesivos hasta no ver cambios de peso significativos, esta significancia correspondía a diferencias menores al 3% del peso.

Figura 10

Muestras en estufa para su secado



3.3 Determinación de contenido de calcio

La determinación del contenido de calcio se llevó a cabo utilizando la técnica de digestión de muestras por vía seca, método de cenizas. Para ello, las muestras con peso registrado fueron secadas en estufa por 48 horas a 60 °C.

Se colocaron las muestras en crisoles de porcelana y fueron llevados a plancha eléctrica para su quemado; este proceso culmina cuando la misma deja de desprender humo (Figura 11). Luego de esto se colocaron los crisoles en una mufla marca FAITHFUL® (Figura 12) en ciclos de 200 °C por una hora seguido de 500 °C por cinco horas. Finalmente se retiraron los crisoles los cuales contienen las cenizas de las muestras (Figura 13).

Figura 11

Crisoles con muestras de madera molida para ser quemados en plancha eléctrica

**Figura 12**

Mufla con crisoles con material vegetal para la obtención de cenizas



Figura 13

Crisoles con cenizas de las muestras



En cada crisol se agregó 5 mL de ácido clorhídrico (HCL) al 20% para disolver las cenizas. Esta dilución se pasó a un matraz aforado y se la llevó a 50 mL mediante el agregado de agua desionizada. Finalmente, el contenido se filtró utilizando filtros de papel y se depositó en frascos esterilizados (Figura 14).

La determinación del contenido de calcio se realizó por absorción atómica en un equipo Perkin Elmer PinAAcle™ 500 en el laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía.

Figura 14

Filtrado y almacenado de las muestras en frascos esterilizados



3.4 Determinación de contenido de cenizas

Para la determinación del contenido de cenizas, las muestras que fueron procesadas en la mufla fueron pesadas (Figura 15). Finalmente, este peso se convirtió en porcentaje respecto al peso inicial de la muestra.

Figura 15

Pesado de cenizas de las muestras



3.5 Análisis Estadístico

Inicialmente, se realizó un análisis descriptivo de los contenidos de extractivos, determinación de calcio y cenizas. Para estas mismas muestras también se analizaron los datos de rendimiento pulpable y densidad básica, las cuales fueron proporcionadas por la empresa forestal.

Posteriormente las variables fueron ajustadas a modelos lineales con el fin de evaluar la relación entre estas y los factores considerados en el estudio; tales como familia, ensayo, cruzamiento y la interacción entre ensayo y repetición. Para cada modelo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los efectos principales y de las interacciones. Aquellos factores que resultaron estadísticamente significativos se sometieron a un test de comparación de medias utilizando la prueba de Tukey, las medias se agruparon y se les asignaron letras (a, b, c, etc.) para indicar diferencias significativas.

Se realizó un ranking de las familias en función de los contenidos de calcio, contenidos de extractivos y contenidos de cenizas. Posteriormente se llevó a cabo un análisis de *clúster* jerárquico con las medias ajustadas por el modelo para los contenidos de calcio y los contenidos de extractivos con el objetivo de agrupar a las familias, para cada variable por separado se realizó un agrupamiento utilizando la función *hclust* y la distancia de Ward. Este análisis permite identificar patrones de agrupación entre las familias, ofreciendo una perspectiva complementaria al análisis previo y resaltando las relaciones entre los grupos de familias con contenidos de calcio y extractivos similares.

Finalmente, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables estudiadas. Este análisis buscó identificar relaciones lineales entre rendimiento pulpable y densidad básica en función del contenido de extractivos, calcio y cenizas. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el programa R.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis descriptivo general de las variables medidas.

La Tabla 5 presenta un resumen descriptivo de los principales parámetros calculados. Se incluyen los valores de media y mediana, que indican la centralidad de la distribución, el rango que muestra la diferencia entre los valores mínimo y máximo y el coeficiente de variación (CV), que refleja la dispersión relativa en relación con la media.

Tabla 5

Parámetros de posición y dispersión de las variables contenido de extractivo, calcio y cenizas

	MEDIA	RANGO	CV
	%		
Extractivos	4,33	0,22 - 15,59	56,00
Calcio	0,20	0,03 - 0,48	49,50
Cenizas	0,76	0,14 - 1,78	35,52

Nota. CV: Coeficiente de Variación.

Para la variable extractivos el valor de la media (4,33) se encuentra dentro de los rangos obtenidos por Pereira et al. (1999), Klash et al. (2010), Bonfatti et al. (2022), Silva et al. (2005), Núñez (2008), Klash et al. (2010), Leal et al. (2011), Zanuncio et al. (2014) y Neiva et al. (2015). Estos rangos tomaron valores de 2,16 - 8,96% y 3,00 - 6,07% para *E. grandis* y *E. dunnii* respectivamente.

Analizando el coeficiente de variación, se observa que los datos tienen gran variabilidad en relación con la media, ya que este fue de 56,00%, esto también se puede apreciar observando el rango, donde se ve una gran amplitud de los datos.

Para la variable de contenido de calcio se obtuvo un valor medio de 0,20%, este se encuentra dentro del rango de valores elaborado a partir de los contenidos presentados para otras especies de *Eucalyptus* por Salmenoja et al. (s.f.), Giosa Casalongue (2009), Santos et al. (2015), Hernández et al. (2009) y Vegunta (2023), el cual varió de 0,07% - 0,46%. Observando el coeficiente de variación, un 49,50% nos indica que los datos tienen una variación considerable en relación con la media.

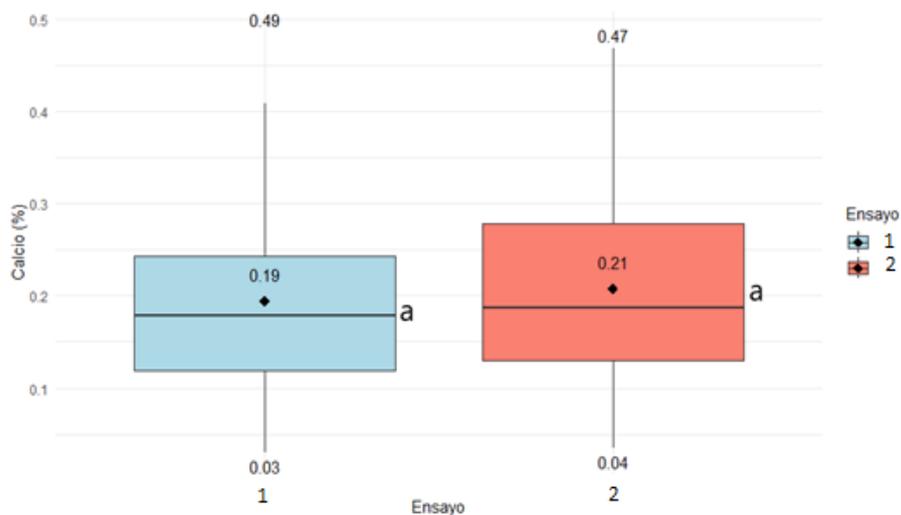
La variable ceniza arrojó un resultado medio de 0,76 %, este es ligeramente superior al rango obtenido por los diferentes autores, el cual varió de 0,31 % - 0,73% por lo cual es un contenido esperable. Para el coeficiente de variación, puede observarse una menor variabilidad, e incluso presenta menor CV que las variables anteriormente descritas.

4.2 Contenido de calcio

En las Figuras 16 y 17 se presentan los parámetros descriptivos como medias, rangos y coeficientes de variación, del contenido de calcio en función de los diferentes ensayos y cruzamientos.

Figura 16

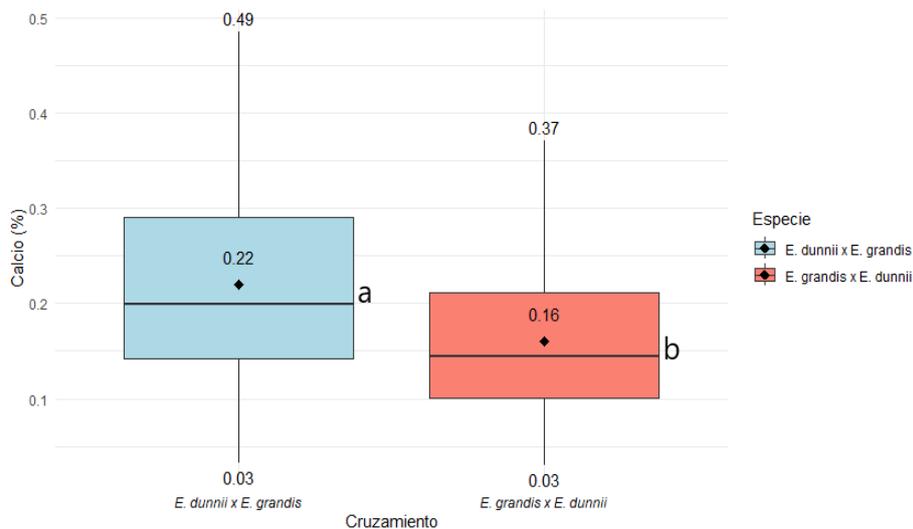
Parámetros descriptivos para la variable calcio por ensayo



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

Figura 17

Parámetros descriptivos para la variable calcio por cruzamiento



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

En la Figura 16 se observa que los individuos de ambos ensayos presentan una media de calcio similar siendo esta ligeramente mayor en el ensayo 2 (0,21 %) en relación con el ensayo 1 (0,19 %) pero no se encontraron diferencias significativas. En cuanto a los rangos, estos son similares, aunque en el ensayo 1 se presenta un límite superior levemente mayor. Observando los coeficientes de variación, estos difieren solo en un 3%, siendo estos de 52,6 % y 49,5% para el ensayo 1 y 2 respectivamente.

La figura 17 muestra los parámetros descriptivos de los datos en función del cruzamiento, es decir que especie actuó como madre y como padre. En la misma se puede observar que la media de los individuos del cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis* es superior (0,22 %) respecto a los del cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* la cual fue de 0,16%, diferencia de las medias que fue significativa estadísticamente.

Observando los rangos, el más amplio se presenta en el cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis*, si bien el límite inferior es similar (0,03 %). En lo que refiere a la variabilidad de los datos, es alta en ambos cruzamientos, sin embargo, el coeficiente de variación de *E. dunnii* x *E. grandis* fue algo inferior al de *E. grandis* x *E. dunnii*, siendo estos de 45,45 % y 50,00 %, indicando una mayor variabilidad en el último cruzamiento.

Debido a que el ANOVA indicó que no existían diferencias significativas entre las familias se decidió realizar un ranking de medias de calcio, con el fin de observar el

ordenamiento de estas en función de sus contenidos y visualizar si el ordenamiento de las familias en el ranking está asociado a un cruzamiento específico.

Tabla 6

Ranking de familias establecido por el contenido de calcio

Posición	Familias	Media calcio %	Cruzamiento
1	10119	0,11	<i>E. gra x E. dun</i>
2	10117	0,11	<i>E. gra x E. dun</i>
3	10115	0,11	<i>E. gra x E. dun</i>
4	7736	0,12	<i>E. gra x E. dun</i>
5	9959	0,14	<i>E. dun x E. gra</i>
6	10111	0,15	<i>E. gra x E. dun</i>
7	10110	0,15	<i>E. gra x E. dun</i>
8	9932	0,17	<i>E. dun x E. gra</i>
9	9864	0,17	<i>E. dun x E. gra</i>
10	9867	0,17	<i>E. dun x E. gra</i>
11	10107	0,17	<i>E. gra x E. dun</i>
12	9985	0,18	<i>E. dun x E. gra</i>
13	9540	0,19	<i>E. gra x E. dun</i>
14	9948	0,19	<i>E. dun x E. gra</i>
15	10108	0,19	<i>E. gra x E. dun</i>
16	9908	0,20	<i>E. dun x E. gra</i>
17	9910	0,21	<i>E. dun x E. gra</i>
18	9996	0,21	<i>E. dun x E. gra</i>
19	9892	0,21	<i>E. dun x E. gra</i>
20	9893	0,22	<i>E. dun x E. gra</i>
21	9853	0,24	<i>E. dun x E. gra</i>
22	9912	0,25	<i>E. dun x E. gra</i>
23	9874	0,26	<i>E. dun x E. gra</i>
24	9921	0,26	<i>E. dun x E. gra</i>
25	9538	0,27	<i>E. gra x E. dun</i>
26	9852	0,27	<i>E. dun x E. gra</i>
27	9871	0,27	<i>E. dun x E. gra</i>
28	9911	0,28	<i>E. dun x E. gra</i>
29	9881	0,29	<i>E. dun x E. gra</i>

Nota. Se muestra tipo de cruzamiento para cada familia. *E. gra x E. dun*: *Eucalyptus grandis x Eucalyptus dunnii*. *E. dun x E. gra*: *Eucalyptus dunnii x Eucalyptus grandis*.

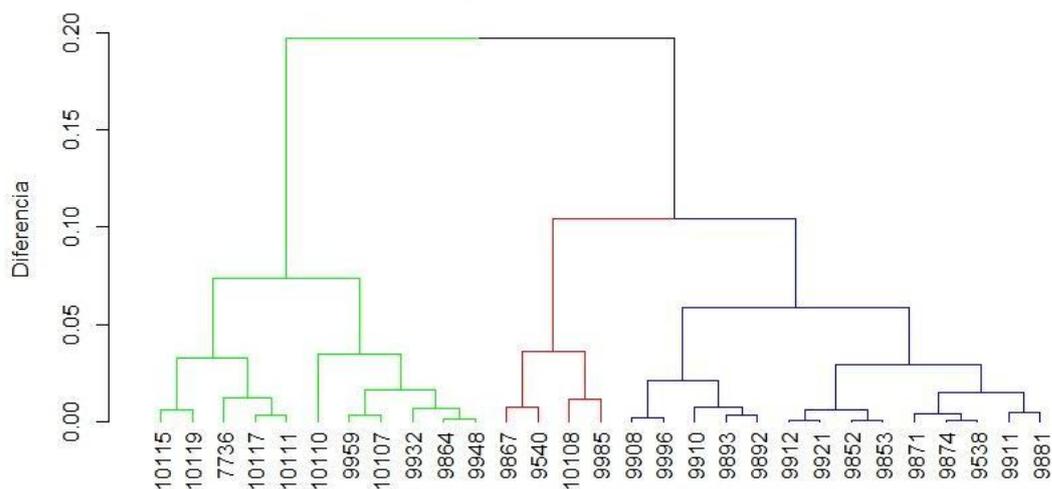
En la Tabla 6 se observa que las familias que presentan bajo contenido de calcio son principalmente del cruzamiento *E. grandis x E. dunnii*, mientras que los cruzamientos *E. dunnii x E. grandis*, presentan valores medios y altos de la tabla. Esto podría estar

indicando que cuando *E. dunnii* actúa como madre, se daría un mayor nivel de acumulación de este ion en los híbridos.

Comparando los contenidos de calcio de referencia presentados por Salmenoja et al. (s.f.), Giosa Casalongue (2009), Santos et al. (2015), Hernández et al. (2009) y Vegunta (2023) vemos que la especie *E. dunnii* presenta una superioridad en relación con *E. grandis*. Si partimos de que trabajamos con híbridos interespecíficos que combinan características de ambos progenitores, se esperaría obtener contenidos de calcio similares entre ambos cruzamientos. Sin embargo, en nuestros resultados observamos que cuando *E. dunnii* se utiliza como madre, los contenidos de calcio son más elevados en comparación con los híbridos en los que se utiliza *E. grandis* como madre. Esta diferencia específica en función de cuál especie se utiliza como madre debería ser estudiada con mayor profundidad, considerando otros factores como el tipo de suelo, ya que las informaciones a nivel nacional son escasas (Fariña, 2014).

Figura 18

Dendrograma de familias híbridas entre Eucalyptus grandis y Eucalyptus dunnii para el contenido de calcio



En la Figura 18 se observa que las familias se agrupan en tres clústeres principales, representados con diferentes colores. El grupo verde incluye a las familias con los niveles más bajos de calcio, destacándose por su homogeneidad y baja variabilidad interna. Dentro de este grupo predomina el cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* aunque también se encuentran presentes familias del cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis*. El grupo rojo

representa niveles intermedios de calcio, funcionando como un punto medio entre los extremos. En el mismo se observa la presencia de familias pertenecientes a ambos cruzamientos, esto indica que no existe un orden específico de distribución. Finalmente, el grupo azul reúne a las familias con los niveles más altos de contenido de calcio y mayor dispersión interna. En este se observan la presencia de familias de ambos cruzamientos, aunque predominan ampliamente cruzamientos de *E. dunnii* x *E. grandis*.

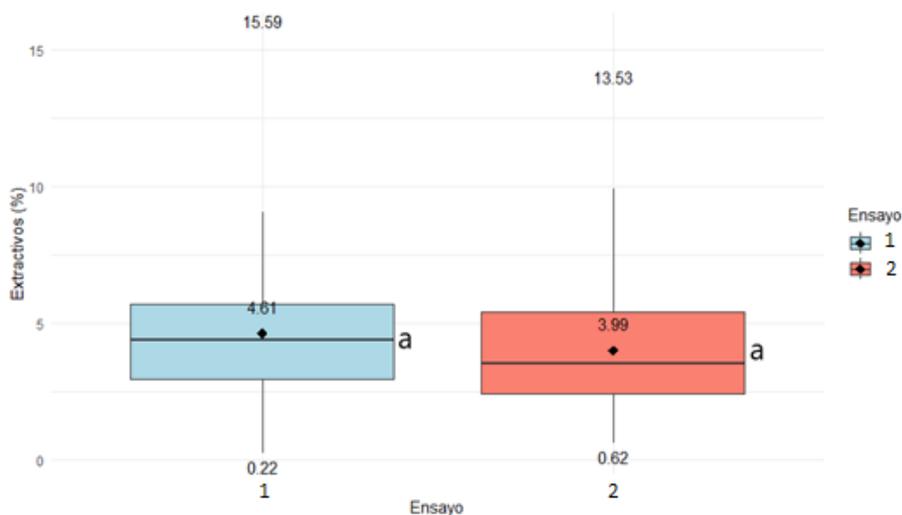
La distribución observada en el clúster muestra una tendencia consistente con el ranking de la Tabla 6, evidenciando que los niveles más altos de contenido de calcio están dominados por los cruzamientos *E. dunnii* x *E. grandis*, mientras que los niveles más bajos corresponden mayoritariamente a los cruzamientos *E. grandis* x *E. dunnii*.

4.3 Porcentaje de extractivos

Los parámetros descriptivos como medias, rangos y coeficientes de variación, del contenido de extractivos en función de los diferentes ensayos y cruzamientos se muestran en las Figuras 19 y 20, respectivamente.

Figura 19

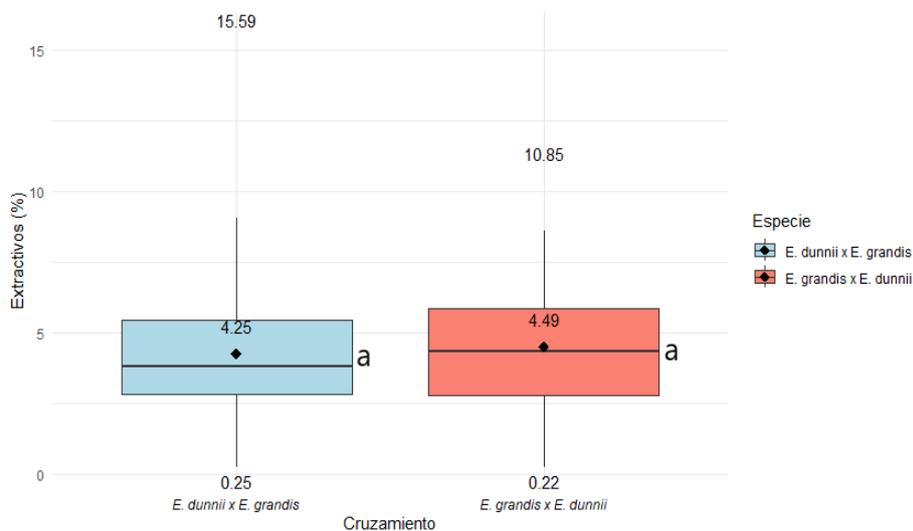
Parámetros descriptivos para la variable extractivos por ensayo



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

Figura 20

Parámetros descriptivos para la variable extractivos por cruzamiento



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

En la Figura 19, se observa la distribución de los contenidos de extractivos en los ensayos 1 y 2. Aunque los valores medios fueron de 4,61 % para el ensayo 1 y 3,99 % para el ensayo 2, el análisis estadístico indicó que estas diferencias no son estadísticamente significativas. Ambos ensayos presentan rangos amplios de valores, de 0,22 % a 15,59 % en el ensayo 1 y de 0,62 % a 13,53 % en el ensayo 2, lo que refleja una alta variabilidad en los datos, con coeficientes de variación de 53,4 % y 58,9 % respectivamente.

En la Figura 20, se representan los contenidos de extractivos en función de los cruzamientos. Los valores medios fueron 4,49 % para el cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* y 4,25 % para *E. dunnii* x *E. grandis*. Sin embargo, estas diferencias también resultaron no significativas según la prueba de Tukey. Los rangos de los cruzamientos abarcaron desde 0,22 % a 10,85 % para *E. grandis* x *E. dunnii*, y de 0,25 % a 15,59 % para *E. dunnii* x *E. grandis*, lo que refleja diferencias en la amplitud de los datos. En cuanto a la variabilidad, el coeficiente de variación fue mayor para el cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis* (60 %) en comparación con *E. grandis* x *E. dunnii* (48,6 %). A pesar de estas diferencias en la dispersión de los datos, el análisis estadístico confirma que no hay diferencias significativas en los contenidos medios de extractivos entre ambos cruzamientos.

Tabla 7*Ranking de familias establecido por el contenido de extractivos*

Posición	Familias	Media extractivos %	Cruzamiento
1	9853	2,45	<i>E. dun x E. gra</i>
2	9538	2,87	<i>E. gra x E. dun</i>
3	9871	2,90	<i>E. dun x E. gra</i>
4	9959	3,09	<i>E. dun x E. gra</i>
5	9910	3,23	<i>E. dun x E. gra</i>
6	10119	3,38	<i>E. gra x E. dun</i>
7	9908	3,58	<i>E. dun x E. gra</i>
8	9874	3,64	<i>E. dun x E. gra</i>
9	10110	3,66	<i>E. gra x E. dun</i>
10	9852	3,79	<i>E. dun x E. gra</i>
11	10111	3,87	<i>E. gra x E. dun</i>
12	9911	4,01	<i>E. dun x E. gra</i>
13	9948	4,25	<i>E. dun x E. gra</i>
14	9921	4,36	<i>E. dun x E. gra</i>
15	9996	4,39	<i>E. dun x E. gra</i>
16	9985	4,47	<i>E. dun x E. gra</i>
17	10108	4,52	<i>E. gra x E. dun</i>
18	9867	4,63	<i>E. dun x E. gra</i>
19	9864	4,65	<i>E. dun x E. gra</i>
20	7736	4,65	<i>E. gra x E. dun</i>
21	9540	4,67	<i>E. gra x E. dun</i>
22	9892	4,78	<i>E. dun x E. gra</i>
23	9893	4,93	<i>E. dun x E. gra</i>
24	9932	5,24	<i>E. dun x E. gra</i>
25	10117	5,45	<i>E. gra x E. dun</i>
26	9881	5,72	<i>E. dun x E. gra</i>
27	9912	6,03	<i>E. dun x E. gra</i>
28	10115	6,20	<i>E. gra x E. dun</i>
29	10107	6,32	<i>E. gra x E. dun</i>

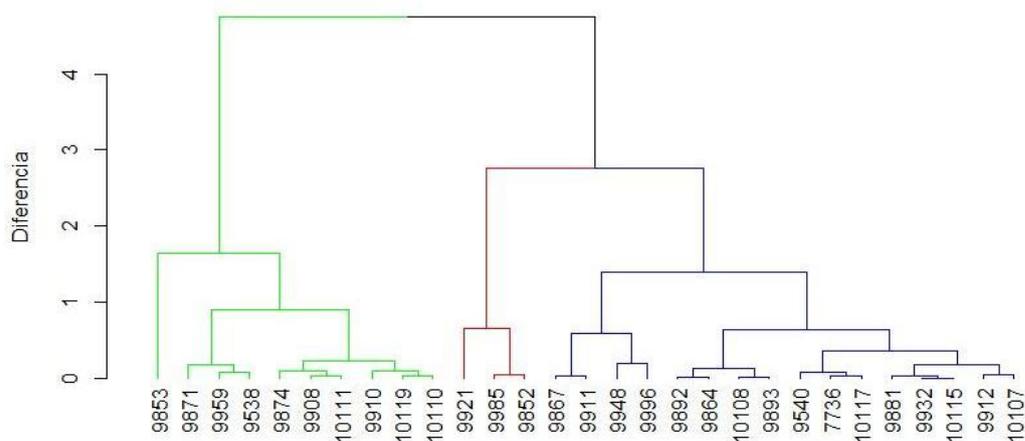
Nota. Se muestra tipo de cruzamiento para cada familia. E. gra x E. dun: *Eucalyptus grandis x Eucalyptus dunnii*. E. dun x E. gra: *Eucalyptus dunnii x Eucalyptus grandis*.

No se observó un claro ordenamiento en cuanto a los contenidos de extractivos entre los diferentes tipos de cruzamientos (Tabla 7). Algunas de las que presentan los menores contenidos corresponden al cruzamiento *E. dunnii x E. grandis* (como la 9853, 9871, 9959 y 9910), sin embargo, también se observan familias del cruzamiento *E. grandis x E. dunnii* que presentan niveles bajos de extractivos (9538, 10119). En general, los

contenidos de extractivos se distribuyen de manera aleatoria entre los dos tipos de cruzamiento, sin una tendencia definida hacia uno u otro, lo que sugiere que no hay un patrón claro que relacione las diferentes familias o tipos de cruzamientos con los niveles más bajos o altos de extractivos, como si se observaba para el contenido de calcio.

Figura 21

*Dendograma de familias híbridas entre *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* para el contenido de extractivos*



En la Figura 21 se observa que las familias se agrupan en tres clústeres principales, representados con diferentes colores. El grupo verde incluye a las familias con los niveles más bajos de extractivos, destacándose por su homogeneidad y baja variabilidad interna. Dentro de este grupo se encuentran presentes ambos cruzamientos en forma aleatoria. El grupo rojo representa los contenidos intermedios de extractivos. En el mismo se observa solamente la presencia de familias pertenecientes al cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis*. Por último, el grupo azul reúne a las familias con los niveles más altos de contenido de extractivos y mayor dispersión interna. Dentro de este se evidencia la presencia de familias de ambos cruzamientos, donde en las secciones del grupo con contenidos menores de extractivos se observa exclusivamente la presencia de familias del cruzamiento *E. dunnii* x *E. grandis*, a medida que los contenidos aumentan comienzan a aparecer familias de ambos cruzamientos de manera aleatoria.

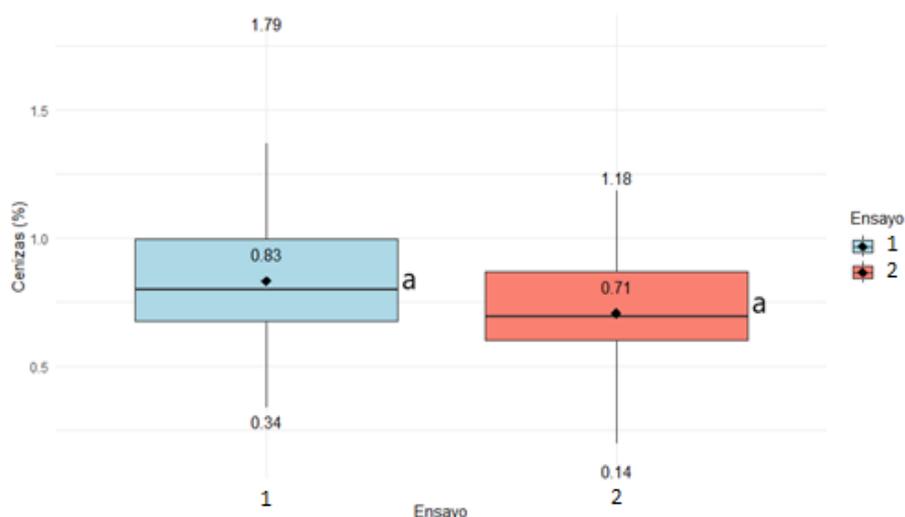
La distribución presentada en el clúster muestra una tendencia similar a la del ranking de la Tabla 7 indicando que los contenidos de extractivos no están asociados a un cruzamiento específico, sino que en general se distribuyen de manera aleatoria.

4.4 Porcentaje de cenizas

En las Figuras 22 y 23 se presentan los parámetros descriptivos como medias, rangos y coeficientes de variación, del contenido de cenizas en función de los diferentes ensayos y cruzamientos.

Figura 22

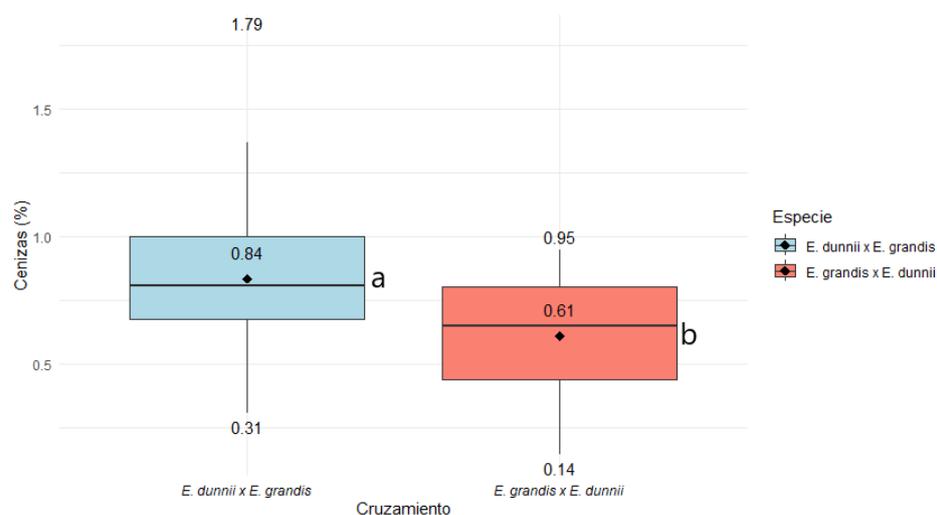
Parámetros descriptivos para la variable cenizas por ensayo



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

Figura 23

Parámetros descriptivos para la variable cenizas por cruzamiento



Nota. Se incluyen las letras correspondientes a las diferencias significativas del análisis estadístico del test de comparación de medias de Tukey.

Cuando se estudiaron las diferencias de contenido de ceniza por ensayo (Figura 22), la media del ensayo 1 (0,83%) fue superior al promedio del ensayo 2 (0,715), pero esta diferencia no fue significativa estadísticamente. Para el ensayo 1, el rango se extiende desde 0,34 % a 1,79 %, presentando mayor amplitud que el obtenido en el ensayo 2, el cual fue de 0,14 % a 1,18 %. En cuanto al coeficiente de variación, para ambos ensayos fue de 35 %, es decir, presentaron menor variabilidad con respecto a los otros componentes de la madera.

Cuando se estudió en esta misma variable el efecto del tipo de cruzamiento (Figura 23), encontramos que la media del cruzamiento de *E. dunnii* x *E. grandis* fue de 0,84%, superior y estadísticamente diferente a la de *E. grandis* x *E. dunnii* (0,61). Por otra parte, comparando los rangos se nota una amplitud superior en el cruzamiento de *E. dunnii* x *E. grandis* ya que el mismo fue de 0,31 % a 1,79 % respecto del rango del cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* el cual fue de 0,14 % a 0,95 %.

En cuanto al coeficiente de variación se puede observar que en el cruzamiento *E. grandis* x *E. dunnii* es alto, debido a que toma un valor de 39,34 %. Por otro lado, el cruzamiento de *E. dunnii* x *E. grandis* presenta un coeficiente de variación del 31,33 %, lo que indica una variabilidad moderada a alta.

Tabla 8*Ranking de familias establecido por el contenido de cenizas*

Posición	Familias	Media Cenizas %	Cruzamiento
1	10115	0,45	<i>E. gra x E. dun</i>
2	7736	0,51	<i>E. gra x E. dun</i>
3	10108	0,51	<i>E. gra x E. dun</i>
4	10107	0,52	<i>E. gra x E. dun</i>
5	9871	0,60	<i>E. dun x E. gra</i>
6	10110	0,61	<i>E. gra x E. dun</i>
7	9932	0,62	<i>E. dun x E. gra</i>
8	9959	0,65	<i>E. dun x E. gra</i>
9	10117	0,65	<i>E. gra x E. dun</i>
10	9912	0,66	<i>E. dun x E. gra</i>
11	10119	0,67	<i>E. gra x E. dun</i>
12	9867	0,68	<i>E. dun x E. gra</i>
13	9910	0,68	<i>E. dun x E. gra</i>
14	10111	0,68	<i>E. gra x E. dun</i>
15	9996	0,71	<i>E. dun x E. gra</i>
16	9852	0,75	<i>E. dun x E. gra</i>
17	9985	0,82	<i>E. dun x E. gra</i>
18	9540	0,83	<i>E. gra x E. dun</i>
19	9908	0,85	<i>E. dun x E. gra</i>
20	9948	0,85	<i>E. dun x E. gra</i>
21	9864	0,86	<i>E. dun x E. gra</i>
22	9874	0,88	<i>E. dun x E. gra</i>
23	9892	0,88	<i>E. dun x E. gra</i>
24	9893	0,89	<i>E. dun x E. gra</i>
25	9881	0,92	<i>E. dun x E. gra</i>
26	9538	0,95	<i>E. gra x E. dun</i>
27	9853	1,02	<i>E. dun x E. gra</i>
28	9911	1,14	<i>E. dun x E. gra</i>
29	9921	1,26	<i>E. dun x E. gra</i>

Nota. Se muestra tipo de cruzamiento para cada familia. *E. gra x E. dun*: *Eucalyptus grandis x Eucalyptus dunnii*. *E. dun x E. gra*: *Eucalyptus dunnii x Eucalyptus grandis*.

Las principales tendencias identificadas en los contenidos de cenizas muestran que las familias que presentan el cruzamiento *E. grandis x E. dunnii* generalmente tienden a presentar contenidos más bajos de cenizas, lo contrario sucede con las familias que presentan el cruzamiento *E. dunnii x E. grandis*, las cuales presentan los mayores contenidos. Este comportamiento es similar al observado en la variable calcio.

4.5 Correlaciones

Las correlaciones de Pearson fueron estimadas entre las variables estudiadas: extractivos, calcio y cenizas, y las variables de calidad de madera: rendimiento pulpable y densidad básica (Tabla 9).

Tabla 9

Correlaciones entre variables rendimiento pulpable y densidad básica con porcentaje de extractivos, calcio y cenizas

Variable	Porcentaje de Extractivos	Porcentaje de Calcio	Porcentaje de Cenizas
Rendimiento Pulpable	-0,27 ***	0,18 *	0,23 *
Densidad Básica	-0,19 *	0,33***	0,25*

Nota. Nivel de significancia: 0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1.

Las correlaciones de Pearson varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una fuerte correlación positiva, valores cercanos a -1 indican una fuerte correlación negativa, y valores cercanos a 0 indican una correlación débil o inexistente. Las correlaciones estudiadas varían desde -0,19, es decir correlaciones negativas hasta valores positivos de 0,33. La correlación más alta y significativa se observó entre el contenido de calcio y la densidad básica (0,33).

La correlación entre la variable de respuesta rendimiento pulpable y el contenido de extractivos arrojó un valor de -0,27 con alta significancia estadística, lo que sugiere que a medida que aumenta el contenido de extractivos, el rendimiento pulpable tiende a disminuir. Estos resultados concuerdan con los presentados por Sixta et al. (2006) el cual menciona que los altos contenidos de extractivos afectan la deslignificación ya que cubren partes de la lignina y disminuye la penetrabilidad del licor. También son consistentes con los presentados por Almeida y De Jesús (2001), donde se señala que los extractivos afectan la penetrabilidad del licor de cocción lo que conduce a utilizar mayor carga de álcali y así una pérdida mayor de celulosa y hemicelulosas en el proceso lo que disminuiría los rendimientos pulpables.

La variable de respuesta rendimiento pulpable en función de los contenidos de calcio dio como resultado una correlación de 0,18 con baja significancia, lo cual indica que no parecería haber un efecto negativo de los contenidos de calcio en el rendimiento pulpable para los materiales estudiados en este trabajo. Este resultado podría explicarse por lo reportado por Vegunta (2023) que menciona como contenidos de calcio en *E. dunnii* tiene un efecto negativo en el rendimiento pulpable cuando los contenidos se encuentran por encima de 0,33%. En nuestro trabajo, aunque encontramos valores de 0,48 %, tenemos un rango de variación muy amplio (49,50 %), lo que podría estar condicionando la baja correlación encontrada. Sin embargo es relevante considerar otros efectos, como el tipo de suelo y el tipo de cocción que no pudieron ser incluidos en este trabajo.

5 CONCLUSIONES

El contenido promedio de extractivos fue de 4,33 %, con un rango de 0,22 % a 15,59 %, sin diferencias significativas entre ensayos, familias y cruzamientos. Las familias no presentaron un ordenamiento específico en función de los contenidos de esta variable.

El contenido promedio de calcio fue de 0,20 %, con diferencias significativas entre cruzamientos: los híbridos con *E. dunnii* como madre presentaron mayores niveles de calcio y cenizas (promedio de cenizas: 0,76 %), mientras que *E. grandis* como madre resultó en contenidos más bajos.

Las correlaciones mostraron que el contenido de extractivos tuvo un impacto negativo sobre el rendimiento pulpable (-0,27), mientras que las correlaciones entre los contenidos de calcio y cenizas con rendimiento pulpable fueron positivas pero débiles (0,18 y 0,23 respectivamente). Si bien el contenido de calcio no tuvo un impacto negativo en el rendimiento pulpable, los niveles encontrados para los cruzamientos con madre *E. dunnii* presentaron niveles que en la literatura indican posible impacto negativo.

Se sugiere priorizar el uso de familias con menores contenidos de extractivos en programas de mejoramiento genético. Además agregar en investigaciones futuras las determinaciones de rendimiento pulpable realizadas con métodos directos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J. M., & De Jesus, S. D. (2001). Efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação kraft de clones de Eucalyptus. En 34° Congresso Anual de Celulose e Papel. <https://doi.org/10.13140/2.1.3734.4646>
- Area, M. C. (Ed.). (2008). *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica*. RIADICYP.
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of Australia* (5th ed.). CSIRO.
- Bonfatti, E. A., Lengowski, E. C., Cabral, B. M., Gonçalves de Oliveira, T. W., Rodrigues de Barros, J. M., Oliveira, R. S., Sulato de Andrade, A., Klock, U. & Agostinho da Silva, D. (2022). Basic wood density, fiber dimensions, and wood chemical composition of four eucalyptus species planted in southern Brazil. *Revista Árvore*, 47, Artículo e4704. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000004>
- Borchert, R. (1990). Ca²⁺ as developmental signal in the formation of Ca-oxalate crystal spacing patterns during leaf development in *Carya ovata*. *Planta*, 182, 339-347. <https://www.jstor.org/stable/23380507>
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Dirección General Forestal. (2021). *Cartografía Nacional Forestal 2021*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/cartografia-nacional-forestal-2021>
- Doldán, J., Poukka, O., Salmenoja, K., Battezzore, M., Fernandez, V., & Eluén, I. (2011). Evaluation of sources and routes of non-process elements in a modern eucalyptus kraft pulp mill. *O papel*, 72(7), 47-52. https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2011_Non-Process_Elements.pdf
- Eaton, R. A., & Hale, M. (1993). *Wood decay, pests and protection*. Chapman and Hall.
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (2009). *Pulp and paper chemistry and technology: Vol. 2. Pulping chemistry and technology*. De Gruyter.

- Eklund, L., & Eliasson, L. (1990). Effects of Calcium Ion Concentration on Cell Wall Synthesis. *Journal of Experimental Botany*, 41(7), 863-867.
<https://doi.org/10.1093/jxb/41.7.863>
- Fariña, I. (2014). *Efecto del calcio en la delignificación de madera para pulpa kraft de eucalyptus dunnii, eucalyptus globulus y eucalyptus grandis* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. <https://www.fing.edu.uy/es/biblio/efecto-del-calcio-en-la-delignificaci%C3%B3n-de-madera-para-pulpa-kraft-de-eucalyptus-dunnii-eucal>
- Foelkel, C. (2011). *Os Eucaliptos e os Elementos Não Processuais na Fabricação de Celulose Kraft*. Eucalyptus Online Book & Newsletter.
https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT24_ElementosNproces.pdf
- Froom, J. (2010). Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. *Tree Physiology*, 30(9), 1140-1147.
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpq024>
- Giosa Casalongue, R. (2009). *Cuantificación del contenido de nutrientes en trozas comerciales de Eucalyptus grandis con destino a la fabricación de pulpa y su relación con el tipo de suelo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/24604>
- Griffiths, A. J., Wessler, S. R., Lewontin, R. C., & Carroll, S. B. (2008). *Genética* (9ª ed.). McGraw Hill Interamericana
- Hernández, J., del Pino, A., Salvo, L., & Arrarte, G. (2009). Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258(2), 92-99.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.050>
- Higuchi, T. (1990). Lignin Biochemistry: Biosynthesis and Biodegradation. *Wood Science and Technology*, 24, 23-63. <https://doi.org/10.1007/BF00225306>
- Hillis, W. E., & Sumitomo, M. (1989). Effect of extractives on pulping. En J. W. Rowe (Ed.), *Natural products of woody plants* (pp. 880-920). Springer.
- Ibáñez, C. M., Mantero, C., Bianchi, M., & Kartal, N. (2009). *Madera, biodeterioro y preservantes*. Universidad de la República.

- Klash, A., Ncube, E., Du Toit, B., & Meincken, M. (2010). Determination of the cellulose and lignin content on wood fibre surfaces of eucalypts as a function of genotype and site. *European Journal of Forest Research*, 129, 741-748.
<https://doi.org/10.1007/s10342-010-0380-5>
- Leal, L. E., Juárez, V., & Terán, M. (2011). Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. *Quebracho*, 19(1-2), 75-83.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48122207008>
- Lehr, M., Miltner, M., & Friedl, A. (2021). Removal of wood extractives as pulp (pre-) treatment: A technological review. *SN Applied Sciences*, 3, Artículo e886.
<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04873-1>
- McLaughlin, S. B., & Wimmer, R. (1999). Tansley Review No. 104 Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytologist*, 142(3), 373-417.
https://www.cambridge.org/core/journals/new-phytologist/article/abs/tansley-review-no-104-calcium-physiology-and-terrestrial-ecosystem-processes/17D6FF7C810E9FD69946AED1B77D6240?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark
- Neiva, D., Fernandes, L., Araújo, S., Lourenço, A., Gominho, J., Simões, R., & Pereira, H. (2015). Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. *Industrial Crops and Products*, 66, 89-95.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.016>
- Núñez, C. E. (2008). *Análisis químico de los recursos fibrosos para pulpa*.
https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=nu%C3%B1ez+2008+análisis+químico+de+los+recursos&btnG=
- Otero, M. (1988). *Celulose e papel. Vol. I: Tecnologia de fabricação da Pasta Celulósica* (2ª ed.). Escola SENAI “Theobaldo De Nigris”; IPT.
- Pandero, C. (2010). *Química de la madera*. Escuela Profesional de Ingeniería Forestal.

- Pereira, J. C. D., Schaitza, E. G., & Higa, A. R. (1999). *Caracterização da densidade básica e da composição química da madeira de Eucalyptus dunnii*. Ministério de Agricultura e do Abastecimento; Embrapa. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/290806/caracterizacao-da-densidade-basica-e-da-composicao-quimica-da-madeira-de-eucalyptus-dunnii>
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., & Tshabalala, M. A. (2012). Cell wall chemistry. En R. M. Rowell (Ed.), *Handbook of wood chemistry and wood composites* (pp. 35-74). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12487>
- Salmenoja, K., Poukka, O., & Battegazzorre, M. (s.f.). *Management of non-process elements in Eucalyptus kraft pulps mills*. https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ABTCP/14_Management%20of%20non-process%20elements%20in%20eucalyptus%20kraft%20mills.pdf
- Saltberg, A., & Brelid, H. (2009). The effect of calcium on kraft delignification: Study of aspen, birch and eucalyptus. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 24(4), 440-447. <https://doi.org/10.3183/npprj-2009-24-04-p440-447>
- Santos, R. B., Gomide, J. L., & Hart, P. W. (2015). Kraft pulping of reduced metal content eucalyptus wood: Process impacts. *BioResources*, 10(4), 6538-6547. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6538-6547>
- Shmulsky, R., & Jones, P. D. (2011). *Forest products & wood science: An introduction* (6th ed.). Wiley-Blackwell.
- Siau, J. (1984). *Transport Processes in Wood*. Springer.
- Silva, C. J., Matos, M. J. L., Oliveira, T. J., & Evangelista, V. W. (2005). Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. *Revista Árvore*, 29(3), 455-460 <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300013>
- Sixta, H., Potthast, A., & Krottschek, W. A. (2006). Chemical pulping process: Sections 4.1–4.2.5. En H. Sixta (Ed.), *Handbook of pulp* (pp. 109-498). Wiley.
- Smook, G. (2019). *Manual para técnicos en pulpa y papel* (4^a ed.). Tappi Press.
- Snyder, E. B. (1972). *Glossary for forest tree improvement workers*. USDA Forest Service.

- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*. Chapman and Hill.
- Vegunta, V. A. (2023). *On calcium-related problems in kraft pulping of Eucalyptus dunnii*. [Trabajo final de grado, KTH Royal Institute of Technology]. Digitala Vetenskapliga Arkivet. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1727372&dswid=-630>
- Vegunta, V. A., Senthilkumar, E. R., Lindén, P., Sevastyanova, O., Vilaplana, F., Garcia, A., Björk, M., Jansson, U., Henriksson, G., & Lindström, M. E. (2022). High calcium content of *Eucalyptus dunnii* wood affects delignification and polysaccharide degradation in kraft pulping. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 37(2), 338-348. <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0069>
- Vignote, P. S., & Martinez, R. I. (2006). *Tecnología de la madera* (3ª ed.). Mundi-Prensa.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in Plants. *Annals of Botany*, 92(4), 486-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Zanuncio, V. A. J., Nobre, C. J. R., Motta, P. J., & Trugilho, P. F. (2014). Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada. *Revista Árvore*, 38(4), 765-770. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400020>
- Zobel, B., & Talbert, J. (1994). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. Limusa.