

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE
Eucalyptus grandis Hill ex Maiden MEDIANTE TÉCNICAS DESTRUCTIVAS
Y NO DESTRUCTIVAS**

por

Joaquín CORBO ITURBURU

Mía RIVARA DARTAYETE

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Compartir Igual**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directores:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Bruzzone

Ing. Agr. Sebastián Quagliotti

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Bruzzone

Ing. Agr. (Dra.) Alejandra Borges

Ing. Agr. Daniel Romero

Fecha:

22 de abril de 2026

Estudiantes:

Mía Rivara Dartayete

Joaquín Corbo Iturburu

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a quienes formaron parte de este proceso a lo largo de estos años.

A nuestros padres, Miriam y Darwin, y a María Eugenia y Fernando, por darnos la posibilidad y el privilegio de la educación.

A nuestros amigos, los de siempre y los que se fueron sumando en el camino.

A nuestra familia, hermanos y novio, quienes acompañaron cada paso de este recorrido.

A nuestros trabajos, de donde siempre recibimos apoyo para poder cumplir nuestras metas.

A nuestros tutores, Ing. Agr. (MSc) Gastón Bruzzzone e Ing. Agr. Sebastián Quagliotti, por el acompañamiento y la dedicación durante tantos meses de ensayos y análisis.

Al Departamento de Materiales y Productos Forestales del LATU, que nos recibió por meses y nos permitió hacer uso de las instalaciones para los ensayos.

A la Ing. Agr. (Dra.) Alejandra Borges por su generosidad a la hora de compartir conocimiento, explicar y brindar ideas.

Agradecemos también al Departamento Forestal de la Facultad de Agronomía (UdelaR) y a Agroempresa Forestal por permitirnos llevar adelante este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	9
SUMMARY.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Objetivos.....	13
1.1.1. Objetivo general.....	13
1.1.2. Objetivos específicos.....	13
1.2. Hipótesis.....	13
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Forestación en Uruguay.....	14
2.2. Generalidades de <i>Eucalyptus grandis</i>	15
2.2.1. Características generales de <i>E. grandis</i>	17
2.2.2. Propiedades anatómicas y calidad de la madera.....	18
2.2.3. Propiedades físicas de <i>E. grandis</i>	20
2.2.4. Propiedades mecánicas de <i>E. grandis</i>	28
2.2.5. Módulo de elasticidad y módulo de rotura.....	32
2.3. Madera juvenil y madera adulta.....	34
2.4. Madera de tensión.....	35
2.5. Clasificación visual de la madera.....	35
2.6. Métodos destructivos y no destructivos.....	36
2.7. Manejos silviculturales para madera de calidad.....	39
2.7.1. Manejo de sitio.....	39
2.7.2. Manejo de material genético.....	40
2.7.3. Implementación de podas y raleos.....	40
2.8. Correlación entre propiedades físicas y mecánicas.....	41
2.9. Modelo de clasificación y regresión.....	41
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1. Materiales.....	43
3.2. Metodología.....	46
3.2.1. Cubicación de las probetas.....	47
3.2.2. Ensayos no destructivos.....	47
3.2.3. Ensayos destructivos.....	50
3.2.4. Contenido de humedad y densidad.....	52
3.2.5. Análisis de datos.....	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56

4.1. Validación del método.....	56
4.2. Análisis descriptivo	57
4.3. Correlación entre métodos: destructivos y no destructivos.....	66
4.4. Análisis del comportamiento de las variables	69
4.5. Análisis de componentes principales	76
4.6. Análisis visual de los defectos y su correlación con atributos de edad y zona	80
4.7. Modelo de clasificación.....	82
4.8. Árbol de decisión.....	85
4.8.1. Validación del árbol	86
5. CONCLUSIONES	90
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
7. ANEXO	99

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla n.

Tabla 1 <i>Datos de edad y predio de los árboles en estudio</i>	45
Tabla 2 <i>Datos silviculturales de poda vinculados a los rodales en estudio</i>	45
Tabla 3 <i>Datos silviculturales de raleo vinculados a los rodales en estudio</i>	46
Tabla 4 <i>Valores de medias para MOE por zona y edad obtenidos con máquina universal</i>	64
Tabla 5 <i>Valores de módulo de rotura obtenidos con máquina universal</i>	66
Tabla 6 <i>Valores de correlación de Spearman para distintos métodos: Máquina universal, Fakopp y Sylvatest en MPa</i>	67
Tabla 7 <i>Análisis de componentes principales PC (%)</i>	77
Tabla 8 <i>Loadings para análisis de componentes principales</i>	78
Tabla 9 <i>Frecuencia de nudos</i>	80
Tabla 10 <i>Tabla de observaciones y tipo de nudo</i>	81
Tabla 11 <i>Análisis de varianza (ANOVA) del MOE script según el tipo de rotura</i>	82
Tabla 12 <i>Resultados del ANOVA</i>	83
Tabla 13 <i>Análisis de medias para Edad</i>	84
Tabla 14 <i>Análisis de medias para Zona</i>	84

Figura n.

Figura 1 <i>Distribución natural de Eucalyptus grandis</i>	16
Figura 2 <i>Gráfica de carga y deformación con zonas delimitadas de comportamiento del material</i>	33
Figura 3 <i>Mapa de referencia de los predios de los árboles en estudio</i>	44
Figura 4 <i>Probetas 1 y 3 en posiciones A, B y C de médula a corteza</i>	47
Figura 5 <i>Ensayo no destructivo en probeta de Eucalyptus grandis utilizando Sylvatest</i>	49
Figura 6 <i>Método destructivo de Flexión en 3 puntos con máquina universal</i>	50
Figura 7 <i>Tipo de rotura según probeta</i>	52
Figura 8 <i>Probetas en estufa para la obtención de contenido de humedad por método gravimétrico</i>	53
Figura 9 <i>Probetas en balanza para obtención de contenido de humedad</i>	53
Figura 10 <i>Gráfica de dispersión de MOE manual con respecto al MOE script</i>	56
Figura 11 <i>Boxplot de MOE (MPa) según edad de los árboles</i>	57
Figura 12 <i>Boxplot de MOE (MPa) según zona dentro de árboles (posición radial de médula a corteza)</i>	58

Figura 13 <i>Boxplot de MOE por zona según edad de los árboles y posición dentro del fuste</i>	59
Figura 14 <i>Diagrama de dispersión de MOE (MPa) para edad evaluado con máquina universal</i>	61
Figura 15 <i>Curvas de densidad de datos, de distribución de MOE según edad, evaluado por máquina universal</i>	62
Figura 16 <i>Curvas de densidad de MOE a 9 años por zona evaluado por máquina universal</i>	62
Figura 17 <i>Curvas de densidad de MOE a 12 años por zona evaluado por máquina universal</i>	63
Figura 18 <i>Curvas de densidad de MOE a 15 años por zona evaluado por máquina universal</i>	63
Figura 19 <i>MOR para el total de probetas del experimento; según edad y posición dentro del fuste</i>	65
Figura 20 <i>Diagrama de dispersión de MOE destructivo y MOE Fakopp con banda de confianza</i>	68
Figura 21 <i>Diagrama de dispersión de MOE destructivo y MOE Sylvatest con banda de confianza</i>	68
Figura 22 <i>Variación de Contenido de humedad (CH) por edad y zona</i>	70
Figura 23 <i>Variación de densidad por edad y zona</i>	70
Figura 24 <i>Variación de altura de árbol (H) en metros por edad</i>	71
Figura 25 <i>Variación de diámetro a altura de pecho de árbol (DAP) en centímetros por edad</i>	71
Figura 26 <i>Matriz de correlación de módulo elástico con todas las variables de interés</i>	73
Figura 27 <i>Correlograma con diagramas de dispersión y valores de correlación con significancia entre variables</i>	74
Figura 28 <i>Matriz de correlación para MOE por edad con todas las variables del ensayo</i>	75
Figura 29 <i>Matriz de correlación para MOE por zona con todas las variables del ensayo</i>	76
Figura 30 <i>Biplot para el análisis multivariado de componentes principales (PCA)</i>	79
Figura 31 <i>Boxplot con promedio de MOE según presencia de nudos</i>	81
Figura 32 <i>Árbol de decisión para Módulo Elástico con método destructivo (MPa)</i>	86
Figura 33 <i>Gráfica de complejidad CP para la regresión planteada</i>	87
Figura 34 <i>Boxplot con MOE por grupos según umbral de densidad en primera ramificación</i>	89

RESUMEN

En Uruguay, el crecimiento del sector forestal y el interés por el uso estructural de la madera justifican la generación de información local para la valorización y clasificación tecnológica de *Eucalyptus grandis*. En este marco, el objetivo general del trabajo fue caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de madera proveniente de plantaciones de 9, 12 y 15 años, evaluar la influencia de la edad y de la posición radial dentro del fuste, y estimar el módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas, analizando su correlación con un método destructivo de referencia. El estudio se desarrolló a partir de probetas obtenidas de madera aserrada, en las cuales se realizaron ensayos no destructivos mediante Fakopp y Sylvatest, así como ensayos destructivos de flexión estática en tres puntos en máquina universal. Además, se determinaron atributos como el contenido de humedad y la densidad, siguiendo procedimientos y normas técnicas reconocidas para la caracterización físico-mecánica. El tratamiento de los datos incluyó estadística descriptiva, análisis de correlación entre métodos y propiedades de la madera, análisis de componentes principales y modelos de clasificación mediante árboles de decisión. Los resultados evidenciaron incrementos en los valores de densidad, módulo de elasticidad y módulo de rotura con la edad y desde la médula hacia la corteza. Los valores medios del módulo de elasticidad fueron de 11.166,2 MPa para 9 años, 13.611,39 MPa para 12 años y 11.313,57 MPa para 15 años. Asimismo, los valores medios del módulo de rotura fueron de 71,197; 74,353 y 76,296 para las respectivas edades. Se identificaron correlaciones significativas entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos mediante métodos no destructivos y los determinados por ensayos destructivos, confirmando tendencias consistentes entre ambos enfoques. Además, se comprobó que la edad y la posición radial influyeron significativamente en las propiedades evaluadas, y que las técnicas no destructivas constituyen una herramienta confiable para inferir el comportamiento mecánico de la madera. Estas técnicas aportan información relevante para la clasificación, valorización y uso estructural de *Eucalyptus grandis* en el contexto productivo y tecnológico nacional, permitiendo además reducir tiempos y costos asociados a la destrucción del material, aunque se evidencia la necesidad de incorporar otras variables para una estimación más precisa del módulo elástico.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, propiedades físico-mecánicas, ensayos no destructivos, ensayos destructivos, módulo de elasticidad

SUMMARY

In Uruguay, the growth of the forestry sector and the increasing interest in the structural use of wood justify the generation of local information to support the technological valorization and classification of *Eucalyptus grandis*. Within this context, the general objective of this study was to characterize the physical and mechanical properties of wood obtained from 9-, 12-, and 15-year-old plantations, to evaluate the influence of age and radial position within the stem, and to estimate the modulus of elasticity using non-destructive techniques, analyzing its correlation with a destructive reference method. The study was carried out using specimens obtained from sawn timber, on which non-destructive tests were performed using Fakopp and Sylvatest instruments, as well as destructive static bending tests under a three-point loading configuration using a universal testing machine. Additionally, attributes such as moisture content and wood density were determined following recognized procedures and technical standards for physical–mechanical characterization. Data analysis included descriptive statistics, correlation analysis between methods and wood properties, principal component analysis, and classification models based on decision trees. The results showed increases in density, modulus of elasticity, and modulus of rupture with increasing age and from pith to bark. The mean values of modulus of elasticity were 11,166.21 MPa for 9 years, 13,611.39 MPa for 12 years, and 11,313.57 MPa for 15 years. Likewise, the mean values of modulus of rupture were 71.197 MPa, 74.353 MPa, and 76.296 MPa for the respective ages. Significant correlations were identified between the modulus of elasticity values obtained through non-destructive methods and those determined by destructive testing, confirming consistent trends between both approaches. Furthermore, it was confirmed that age and radial position significantly influenced the evaluated properties, and that non-destructive techniques constitute a reliable tool for inferring the mechanical behavior of wood. These techniques provide relevant information for the classification, valorization, and structural use of *Eucalyptus grandis* within the national productive and technological context, while also reducing time and costs associated with destructive testing. However, the results also highlight the need to incorporate additional variables in order to achieve a more accurate estimation of the modulus of elasticity.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, physical–mechanical properties, non-destructive tests, destructive testing, modulus of elasticity

1. INTRODUCCIÓN

La forestación en Uruguay ha registrado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas, posicionando al país como un actor competitivo en el sector forestal. Este desarrollo ha sido impulsado por la estabilidad política, económica y social del país, junto con un marco normativo sólido que ha promovido la sostenibilidad y la eficiencia productiva (Uruguay XXI, 2025). Uruguay ha consolidado una industria forestal de referencia internacional, basada en un modelo que combina criterios ambientales rigurosos con eficiencia productiva (Uruguay XXI, 2025).

Desde la promulgación de la Ley Forestal en 1987, el sector ha experimentado un crecimiento significativo, consolidándose como uno de los sectores más dinámicos de la economía nacional y posicionando al país como un referente en el ámbito forestal internacional (Uruguay XXI, 2025).

Uruguay posee un ecosistema productivo diversificado, que abarca la producción de celulosa y papel, la industria de aserrío, la fabricación de tableros, la generación de energía a partir de biomasa y el creciente sector de la construcción en madera (Uruguay XXI, 2025). Según la Dirección General Forestal (DGF, 2024), la superficie forestada del país registró 1.048.228 de hectáreas efectivas y 38.881 hectáreas cosechadas, totalizando 1.087.109 hectáreas destinadas al uso forestal.

En relación con la superficie efectivamente plantada, aproximadamente el 70% corresponde a la especie *Eucalyptus grandis*, la cual se destaca por su adaptabilidad, sanidad y propiedades que favorecen su utilización en la industria celulósica y aserrable (DGF, 2024). Esta especie es una de las más empleadas en Uruguay y en el ámbito internacional debido a su rápido crecimiento y versatilidad de uso (DGF, 2024).

El conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas resulta esencial para optimizar su aprovechamiento en la industria maderera y en aplicaciones estructurales. En este contexto, la producción de madera estructural se basa en un manejo silvicultural riguroso, destinado a obtener *madera clear* (libre de defectos), lo que garantiza un material con características adecuadas de calidad y resistencia para su comercialización y uso estructural.

La producción forestal orientada a la obtención de madera de calidad desempeña un rol importante en el desarrollo económico regional. La calidad de los productos de madera depende de sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales determinan su comportamiento frente a diferentes condiciones de uso, por ejemplo, en la madera contrachapada.

El estudio del comportamiento mecánico de la madera es fundamental para su adecuada aplicación como material estructural. En Uruguay, la evaluación de sus propiedades se apoya mayoritariamente en normas y parámetros desarrollados en otros países, lo que fundamenta la necesidad de generar conocimiento propio que refleje las particularidades de las especies adaptadas al ecosistema uruguayo, manejos silvícolas y condiciones locales. El crecimiento sostenido del sector forestal y el interés creciente por el uso estructural de la madera hacen imprescindible avanzar en investigaciones que permitan caracterizarla con rigurosidad y apoyar su utilización en diseños seguros y eficientes, logrando un material noble para el uso en otras profesiones.

Numerosos estudios han caracterizado las propiedades de la madera de *E. grandis* mediante ensayos destructivos. Conjuntamente, se han desarrollado técnicas no destructivas, como el ultrasonido y las vibraciones, que permiten evaluar la calidad de la madera sin alterar su integridad. Estos métodos han demostrado buena precisión en la estimación de las propiedades físico-mecánicas, aunque las correlaciones varían según la edad, el sitio de crecimiento y el manejo silvicultural (Wang & Carter, 2015).

En Uruguay, la información disponible sobre *E. grandis* continúa en desarrollo, por lo que su actualización resulta necesaria para fortalecer la base de conocimiento del sector forestal. Considerando que el cultivo de esta especie requiere tiempo e inversión, la aplicación de técnicas no destructivas adquiere especial relevancia para obtener información confiable y eficiente. En este contexto, el presente estudio evalúa y valida estos métodos como herramientas prácticas y sostenibles para la caracterización de la madera.

En el siguiente estudio se abordará la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de *Eucalyptus grandis*, empleando ensayos destructivos y no destructivos. La obtención de información actualizada que permita la evaluación entre ambos métodos, y propuestas de herramientas prácticas que permitan estimar la calidad de la madera, son fundamentales para el desarrollo en conocimiento de la industria de madera aserrable. Información actualizada sobre el comportamiento de *E. grandis* en condiciones locales, y la validación del uso de técnicas no destructivas como alternativa a los ensayos de referencia (flexión estática en tres puntos) deben contribuir a mejorar los procesos de clasificación y valorización de la madera, favoreciendo su incorporación en mercados de mayor exigencia.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar las propiedades mecánicas y físicas de *Eucalyptus grandis* provenientes de plantaciones de 9, 12 y 15 años.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estimar los valores del módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas y analizar su correlación con el método de referencia.
- Evaluar los valores de resistencia, módulo de elasticidad y densidad en las tres edades estudiadas y en tres posiciones radiales diferentes dentro del fuste.

1.2. Hipótesis

La hipótesis de trabajo es la siguiente:

Las diferencias de edad en *Eucalyptus grandis* influyen significativamente en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, tanto en los valores obtenidos mediante ensayos destructivos como en los estimados por técnicas no destructivas, evidenciándose variaciones en el módulo de elasticidad entre árboles de 9, 12 y 15 años considerando sus condiciones de sitio.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Forestación en Uruguay

Según Uruguay XXI (2025), en la actualidad, aproximadamente 4.000 empresas mantienen una vinculación directa con el sector forestal, generando empleo para más de 18.000 personas. La incorporación de inversión extranjera ha sido determinante en su desarrollo, al promover mejoras en la eficiencia productiva y en la calidad mediante el aprovechamiento de economías de escala y la adopción de estándares internacionales (Uruguay XXI, 2025). En el ámbito comercial, las exportaciones forestales han alcanzado un desempeño destacado: la celulosa se consolidó como el principal producto de exportación del país, con un valor de 3.007 millones de dólares, lo que representa un incremento del 27% respecto a 2023 (Uruguay XXI, 2025).

El incremento en las ventas de madera aserrada, chips y madera en bruto fortaleció la participación del sector dentro del total de exportaciones de bienes, lo que confirma su creciente relevancia en la economía uruguaya (Uruguay XXI, 2025).

El sector forestal en Uruguay comprende un amplio conjunto de actividades que abarcan desde la producción de semillas y plantines hasta el procesamiento industrial, el transporte y la comercialización de productos finales (Uruguay XXI, 2025). Incluye la cadena celulósico-papelera, que produce madera rolliza, chips, pulpa de celulosa, papel y cartón; la transformación mecánica, que transforma la madera en productos intermedios y elaborados como tableros, vigas laminadas y paneles; y la generación de energía a partir de biomasa (Uruguay XXI, 2025). Según Uruguay XXI (2025), estas actividades se desarrollan en tres fases principales: una fase primaria, que comprende la producción de plantines, la plantación, el manejo silvícola y la cosecha; una fase secundaria, que involucra la transformación química o mecánica de la madera y su comercialización; y una fase logística y de servicios asociados, que incluye la gestión de la cadena de suministro, el transporte y la consultoría especializada (Uruguay XXI, 2025).

En conjunto, el sector forestal garantiza el flujo de bienes forestales desde el bosque hasta los mercados, promoviendo tanto la sostenibilidad ambiental como la rentabilidad económica del país (Uruguay XXI, 2025).

Según Uruguay XXI (2025), la industria de productos forestales está compuesta por grandes empresas integradas verticalmente, que controlan el proceso completo desde la producción agraria hasta la comercialización final. Las principales empresas exportadoras se abastecen de materia prima propia, mientras que los aserraderos de mayor tamaño utilizan principalmente recursos forestales nacionales y destinan gran

parte de su producción al mercado exterior. En contraste, las empresas de menor escala orientan sus ventas principalmente al mercado interno y carecen de una integración vertical completa.

En Uruguay se identifican cuatro modelos forestales: (1) plantaciones de *E. globulus* de 10 a 12 años con destino a pulpa; (2) plantaciones de *Pinus taeda* de 18 a 24 años con destino a aserrío; (3) plantaciones de *E. grandis* y *E. dunnii* de 10 a 12 años con destino a pulpa; y (4) plantaciones de *E. grandis* y *E. dunnii* de 10 a 12 años con destino a aserrío (Uruguay XXI, 2025). El presente trabajo se centra en el modelo 4, correspondiente a plantaciones de *Eucalyptus grandis* para aserrío, considerando la disponibilidad local de madera y su potencial uso estructural en la construcción (Uruguay XXI, 2025).

La madera de aserrío de *E. grandis* (modelo 4) se ha consolidado como un producto con creciente presencia en los mercados del sudeste asiático, donde se utiliza como materia prima en la industria de muebles orientada a la exportación hacia Europa. No obstante, su volumen anual de exportación presenta variaciones asociadas a los precios internacionales de la madera (Uruguay XXI, 2025).

2.2. Generalidades de *Eucalyptus grandis*

Eucalyptus grandis Hill ex Maiden, conocido comúnmente como eucalipto rosado o eucalipto inundable, es una especie originaria de la costa este de Australia (Meskimen & Francis, s.f.). Según Meskimen y Francis (s.f.), su distribución natural se extiende desde el norte de Nueva Gales del Sur hasta el sur de Queensland (Figura 1), en regiones de clima subtropical húmedo. Estas regiones se caracterizan por temperaturas mínimas promedio durante el mes más frío que oscilan entre 2 y 10°C, y temperaturas máximas promedio en el mes más cálido próximas a 29°C (Meskimen & Francis, s.f.). Según los autores, las precipitaciones anuales varían entre 1020 y 1780 mm, concentrándose principalmente en los meses de verano, lo que evidencia un régimen de lluvias estacional bien definido. Estas condiciones hacen que la especie presente una elevada demanda hídrica, asociada a sus altas tasas de crecimiento. Aun durante la estación seca, las precipitaciones mensuales suelen superar los 20 mm, manteniendo condiciones favorables para el desarrollo de la especie. Estas características climáticas explican la amplia adaptabilidad de *E. grandis* en regiones templadas y húmedas fuera de su área de origen, como ocurre en varias zonas de Uruguay y América del Sur (Meskimen & Francis, s.f.).

Diversos estudios realizados en Sudamérica confirman que *E. grandis* exhibe una elevada plasticidad ecológica y una amplia capacidad de adaptación en ambientes fuera de su área de origen, siempre que se mantengan condiciones de adecuada

disponibilidad hídrica y suelos profundos, bien drenados y de fertilidad media a alta (Food and Agriculture Organization [FAO], 1979).

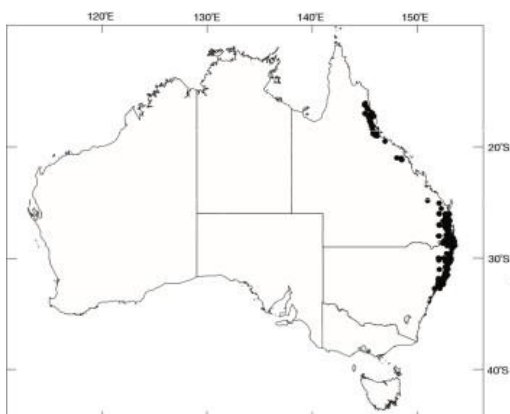
En Brasil, Gonçalves et al. (2013) demostraron que el crecimiento de *E. grandis* está fuertemente condicionado por el contenido de agua en el suelo y por la disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno, fósforo y potasio, evidenciando una respuesta marcada a la fertilización en sitios de baja fertilidad natural.

En Argentina, *Eucalyptus grandis* constituye una de las especies forestales más plantadas, donde las condiciones climáticas subtropicales favorecen su establecimiento y crecimiento. Estudios realizados en plantaciones experimentales indican que el crecimiento de la especie se encuentra estrechamente vinculado a variables climáticas, particularmente la temperatura y la disponibilidad hídrica, observándose reducciones en los incrementos de crecimiento durante períodos de sequía o condiciones ambientales adversas (Ramos & Garin, 2022). Asimismo, se ha identificado una elevada susceptibilidad a heladas intensas, lo que limita su uso a regiones de inviernos moderados o con baja frecuencia de eventos extremos (Balmelli & Resquín, 2006).

En Uruguay, *E. grandis* se adapta favorablemente en la región norte y noreste del país, caracterizada por suelos arenosos y franco-arenosos bien drenados, un régimen de lluvias relativamente elevado y temperaturas estivales favorables para el crecimiento (Resquin et al., 2024). No obstante, la principal limitante ambiental continúa siendo la sensibilidad a heladas severas, capaces de generar daños fisiológicos, reducir el crecimiento o incluso causar mortalidad en plantaciones jóvenes (Resquin et al., 2024). En este contexto, la adecuada selección del sitio de plantación resulta determinante para optimizar la productividad, mantener la sanidad del rodal y asegurar la calidad final de la madera obtenida.

Figura 1

Distribución natural de Eucalyptus grandis



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

En Uruguay, *E. grandis* se ha consolidado como una de las especies más plantadas, debido a su alto rendimiento, buen comportamiento fitosanitario y versatilidad productiva. Su madera permite obtener tanto materia prima apta para pulpa de celulosa como madera de calidad para aserrío, según el manejo silvícola aplicado (DGF, 2024). La especie se planta principalmente en el norte del país, región que se caracteriza por la presencia de heladas invernales, temperaturas estivales elevadas y predominio de suelos arenosos, condiciones que resultan favorables para su crecimiento (DGF, 2024). En general, las plantaciones de esta zona se destinan a la producción de madera de calidad orientada al aserrado y a las aplicaciones estructurales.

En cuanto a los requerimientos edáficos, *E. grandis* presenta un mejor crecimiento en suelos profundos y bien drenados. Su madera presenta tonalidades rosadas y una densidad bastante variable, que oscila aproximadamente entre 545 y 955 kg/m³ (A. Baietto, comunicación personal, 9 de marzo, 2024).

Los principales usos de esta especie incluyen la construcción, carpintería, fabricación de paneles contrachapados y pisos, así como la producción de pasta de celulosa. Se desarrolla con mayor eficiencia en climas húmedos subtropicales o templados cálidos con lluvias estivales, aunque también puede adaptarse a regiones con régimen de precipitaciones más uniformes (A. Baietto, comunicación personal, 9 de marzo, 2024). No forma ligno tubérculos y presenta baja capacidad de rebrote, además de una tolerancia limitada a las heladas (A. Baietto, comunicación personal, 9 de marzo, 2024). En síntesis, *E. grandis* presenta una adecuada adaptación a las condiciones ambientales de Uruguay, caracterizada por su buen rendimiento y la calidad de su madera para uso estructural. Sin embargo, su principal limitante en el país continúa siendo la sensibilidad a las bajas temperaturas, aspecto que debe considerarse en la planificación silvícola.

2.2.1. Características generales de *E. grandis*

En Uruguay, el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en términos de diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total presenta una elevada variabilidad, incluso para rodales de una misma edad. Esta variabilidad responde principalmente a diferencias en las condiciones de sitio, manejo silvícola y material genético disponible. Estudios realizados en plantaciones experimentales del país indican que el crecimiento en diámetro y altura puede variar significativamente según las características del suelo, el régimen de manejo y las condiciones ambientales locales (Caamaño Lamela & Stirling Estigarribia, 2009; Methol, 2008).

Para plantaciones jóvenes y de edad intermedia, los valores de crecimiento reportados

para *Eucalyptus grandis* en Uruguay muestran incrementos sostenidos tanto en diámetro como en altura, aunque con variabilidad entre sitios. Simulaciones de crecimiento y estudios de rodales indican que hacia los 8-12 años pueden observarse diámetros medios cercanos a 17-22 cm dependiendo del índice de sitio y de la densidad inicial del rodal, evidenciando la influencia de las condiciones de crecimiento sobre la productividad de la especie (Methol, 2008). En edades posteriores, la dispersión de los valores de diámetro y altura aumenta debido al efecto acumulado de factores ambientales y de manejo sobre el desarrollo del rodal (Caamaño Lamela & Stirling Estigarribia, 2009). La ampliación de los rangos de crecimiento a edades mayores sugiere que, a medida que los rodales envejecen, el efecto del sitio adquiere un peso relativo creciente frente a la edad cronológica. Factores como la disponibilidad hídrica, la fertilidad y profundidad efectiva del suelo, el drenaje, la exposición a vientos dominantes y la ocurrencia de heladas tardías influyen de manera acumulativa sobre el crecimiento diamétrico y en altura, generando respuestas contrastantes entre predios incluso bajo una misma especie y edad.

2.2.2. Propiedades anatómicas y calidad de la madera

El creciente interés por el uso de materiales constructivos sostenibles, más respetuosos con el medio ambiente y que actúen como sumideros de carbono, ha posicionado a la madera como un material cada vez más relevante en el sector de la construcción (Araya et al., 2022). Al evaluar las propiedades de la madera, es fundamental considerar las múltiples fuentes de variación, tanto las asociadas a las prácticas silviculturales como las inherentes a la especie y a la posición dentro del árbol.

Una cualidad de importancia tecnológica en las especies latifoliadas es la proporción relativa de duramen y albura. Generalmente, cuando la producción forestal se orienta a la obtención de madera sólida, se busca una mayor proporción de duramen (Pereira et al., 2013). El contenido de duramen aumenta con la edad, los turnos de rotación destinados a la producción de madera de calidad suelen ser más extensos que aquellos orientados a la obtención de pulpa, con diferencias que oscilan entre 15-18 y 9-11 años, respectivamente (Pereira et al., 2013).

El duramen cumple un rol fundamental en la producción de madera de calidad. Diversos estudios indican que la proporción de duramen en el fuste aumenta con la edad del árbol y con su tamaño, incluso entre individuos de una misma edad. Según Moreno et al. (2024), estos aspectos se relacionan con una mayor resistencia al deterioro por agentes bióticos y abióticos (durabilidad natural), menor higroscopicidad, y en consecuencia, mayor estabilidad dimensional. El duramen también se asocia con mejores

características de color y apariencia, aspectos relevantes para su aprovechamiento para productos de madera sólida. En este sentido, *Eucalyptus grandis* presenta propiedades físicas y mecánicas adecuadas para la producción de madera de calidad.

Eucalyptus grandis es una especie ampliamente cultivada en el Cono Sur debido a su rápido crecimiento y versatilidad productiva. En el caso de la madera destinada a productos de mayor valor, la calidad del material depende principalmente de la proporción y las propiedades del duramen, de las propiedades de la albura y de la anisotropía de su estructura anatómica. Investigaciones recientes en clones muestran que la proporción de duramen en *E. grandis* varía significativamente según el origen genético, la edad de corte y las condiciones de sitio (Bulman-Hartkopf et al., 2024). En consecuencia, algunas plantaciones alcanzan proporciones de duramen adecuadas para usos estructurales o de mobiliario, mientras que otras mantienen un mayor porcentaje de albura, menos aptas para aplicaciones que requieren alta durabilidad (Bulman-Hartkopf et al., 2024).

Según Doldán (2003), el duramen de *E. grandis* presenta una diferenciación cromática generalmente leve o moderada respecto de la albura, de modo que el contraste entre ambas zonas resulta limitado. Esta condición dificulta la identificación visual durante el aserrado y la selección de piezas con fines estéticos. Según los autores, en relación con la durabilidad natural, los ensayos realizados en la región evidencian que el duramen presenta una resistencia moderada frente a hongos de pudrición, correspondiente a las clases de durabilidad 3–4 según protocolos normalizados de laboratorio. En contraste, la albura presenta baja resistencia biológica, por lo que requiere tratamientos preservantes para su uso en exteriores o en contacto con el suelo (Doldán, 2003). Esta distinción funcional entre duramen y albura determina la selección de piezas estructurales y los tratamientos de preservación y clasificación correspondientes (Doldán, 2003).

En la caracterización de la madera, es fundamental considerar la anisotropía, ya que sus propiedades físicas y mecánicas varían según la dirección del grano. Este comportamiento se debe a la estructura anatómica del material, compuesta por fibras, vasos y células orientadas principalmente en la dirección del crecimiento del árbol. La anisotropía influye directamente en la estabilidad dimensional y en la respuesta frente a los cambios de humedad. En general, la contracción tangencial es mayor que la radial, lo que incrementa la presencia de deformaciones y rajaduras durante el aserrado y el secado de la madera (Tsoumis, 1991).

Para Palermo et al. (2015), las diferencias anatómicas entre la madera juvenil y adulta,

junto con las variaciones en la longitud de las fibras y el espesor de la pared celular a lo largo del radio, son factores que contribuyen a la anisotropía de la madera y explican las variaciones de comportamiento entre las piezas. En este contexto, según el autor, para obtener madera de calidad, caracterizada por baja deformación, menor proporción de albura y buena estabilidad dimensional, se sugiere aplicar prácticas de manejo que promuevan la formación de madera adulta. Entre ellas se destacan una mayor edad de corte, el manejo adecuado de la densidad de fuste y la selección genética de los individuos (Palermo et al., 2015). Asimismo, los procesos de secado contribuyen a reducir tensiones internas y contracciones en el material (Palermo et al., 2015).

En términos prácticos, *E. grandis* puede considerarse una especie apta para la producción de madera de calidad cuando se seleccionan clones o materiales genéticos con mayor tendencia a formar duramen, se planifican rotaciones y manejos de densidad que promuevan la formación de madera adulta, se aplican procedimientos adecuados de clasificación y secado tras el aserrío, y se utilizan tratamientos de preservación cuando la albura se encuentra en proporciones elevadas. Estas medidas permiten aprovechar la buena trabajabilidad y el rápido crecimiento de *E. grandis*, asegurando la calidad física requerida para aplicaciones estructurales, de carpintería y productos de alto valor agregado.

2.2.3. Propiedades físicas de *E. grandis*

La madera, como material natural de origen vegetal, presenta una serie de propiedades físicas que influyen directamente en su comportamiento como materia prima y en su aprovechamiento industrial. Estas propiedades dependen de su estructura anatómica, su composición química y las condiciones de crecimiento del árbol. A continuación, se describen las propiedades físicas más relevantes para su caracterización y uso tecnológico.

2.2.3.1. Humedad de la madera

La madera en estado verde presenta un elevado contenido de agua, la cual se encuentra en el interior del material en diferentes formas y proporciones. El contenido de humedad es una variable determinante para las propiedades mecánicas y tecnológicas de la madera, ya que influye en su densidad, resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad (Glass & Zelinka, 2010). La cantidad de agua presente en una pieza de madera depende de varios factores, entre ellos se destacan: la especie, en función de sus características anatómicas, la densidad de la madera, relacionada con su porosidad, la posición dentro del fuste, el espesor de la pieza, la temperatura y el tiempo de secado. El contenido de

humedad varía según la humedad relativa del aire, lo que genera procesos de contracción e hinchamiento que afectan la estabilidad dimensional de la madera y en consecuencia, su comportamiento como material de construcción. Esta propiedad posee una relevancia económica significativa para la industria, debido a que afecta el peso del material y aumenta los costos asociados a su transporte.

Para Simpson y TenWolde (1999), la humedad de equilibrio corresponde al contenido de humedad límite que alcanza la madera cuando se encuentra expuesta a condiciones atmosféricas constantes de temperatura y humedad relativa. En contacto con el medio ambiente, la madera intercambia humedad con el aire hasta alcanzar un estado de equilibrio higroscópico (Simpson & TenWolde, 1999). A nivel Industrial, este valor define el contenido de humedad que debe presentar la madera para ser procesada sin riesgos de fisuras, rajaduras o deformaciones, garantizando su conservación durante las etapas de aserrado, secado, transformación y uso (Simpson & TenWolde, 1999).

El agua presente en la madera puede encontrarse en tres formas distintas. La primera corresponde al agua de constitución, que forma parte de la estructura química de tejidos y células, y representa aproximadamente entre 0,5 – 1% del contenido total de humedad (Simpson & TenWolde, 1999). Esta fracción de agua no puede eliminarse mediante procesos de secado. La segunda forma es el agua higroscópica o de impregnación, que se encuentra adsorbida en las paredes celulares y mantiene saturadas las fibras de la madera, constituyendo entre 1 y 28-30% del contenido total de humedad (Simpson & TenWolde, 1999). Finalmente, el agua libre o de capilaridad ocupa los lúmenes celulares y los espacios intercelulares, aunque no influye significativamente en las propiedades de la madera, salvo el peso específico (Galligan et al., 2015).

Siguiendo a Tsoumis (1991), el punto de saturación de las fibras (PSF) corresponde al nivel de humedad en el que toda el agua libre ha sido eliminada, pero las paredes celulares aún retienen agua higroscópica. Por encima del PSF, la pérdida de agua no modifica de manera significativa las propiedades mecánicas, mientras que por debajo del PSF, la resistencia y la rigidez aumentan progresivamente (Tsoumis, 1991). En maderas latifoliadas de porosidad difusa, este valor se sitúa entre 32 y 35%. Considerando este comportamiento, la madera experimenta hinchamiento al absorber humedad desde el 0% hasta el PSF, y contracción al perder agua desde el PSF hasta alcanzar el contenido de humedad anhidro (Tsoumis, 1991).

Según *Standard test methods* (2025), el contenido de humedad en la madera puede determinarse mediante dos métodos principales, directos e indirectos. Los métodos directos, también denominados destructivos, implican la separación completa del agua

contenida en la madera de los demás componentes del material. Entre ellos, para los autores, el más empleado en los ensayos de laboratorio, es el método gravimétrico o de secado en estufa, en el cual la humedad se elimina mediante calentamiento controlado hasta alcanzar un peso constante. Por otra parte, los métodos indirectos o no destructivos estiman el contenido de humedad a través de la medición de propiedades físicas de la madera que varía en función de su humedad interna, principalmente la resistencia eléctrica (*Standard test methods*, 2025). Estos métodos se basan en la relación entre la conductividad eléctrica del material y la cantidad de agua contenida en sus paredes celulares, principio que sustenta el funcionamiento de instrumentos como el Xilohigrómetro (*Standard test methods*, 2025).

El método gravimétrico, también denominado método de secado en estufa, es la técnica de referencia más utilizada para determinar el contenido de humedad en la madera, debido a su precisión y simplicidad (Glass & Zelinka, 2010). Este procedimiento consiste en calcular la pérdida de masa de una muestra al ser sometida a un proceso de secado controlado hasta alcanzar un peso constante. Este método es reconocido internacionalmente como estándar, ya que proporciona resultados exactos y reproducibles, aunque requiere un tiempo de secado prolongado que varía según el tamaño de la muestra. En la práctica industrial, los métodos indirectos se emplean con mayor frecuencia por su rapidez, pero siempre se contrastan con el método gravimétrico como referencia para garantizar la confiabilidad de las mediciones (Glass & Zelinka, 2010).

Este método presenta diversas ventajas, entre las que se destacan su sencillez de aplicación, la precisión de los resultados obtenidos, su idoneidad para especies con alto contenido de resinas o aceites volátiles a baja temperatura, y el no requerir de instrumentos muy costosos. Sin embargo, este método presenta limitaciones, ya que se trata de un procedimiento destructivo que demanda tiempos prolongados de secado para la obtención de resultados. Además, la determinación se realiza sobre una muestra de tamaño reducido, que puede no ser representativa, y requiere el cálculo posterior del contenido de humedad a partir de la pérdida de masa.

El contenido de humedad de la madera de *Eucalyptus grandis* varía significativamente según la edad del árbol, la posición radial y axial dentro del fuste, y las condiciones de crecimiento. Diversos estudios coinciden en que la madera juvenil, caracterizada por una mayor proporción de albura, presenta contenidos de humedad inicial (en estado verde) más elevados que la madera madura o proveniente de zonas periféricas del fuste (Sseremba et al., 2016).

Bal et al. (2011) analizaron la variación del contenido de humedad verde en *E. grandis* cultivado en Turquía y reportaron valores entre 56 % y 111 %, con un promedio de aproximadamente 82 % a la altura del pecho. Los autores observaron diferencias significativas entre la madera interna (juvenil) y la externa (madura), siendo la primera la que presentó mayor contenido de humedad. Este comportamiento se asocia a la menor densidad y la mayor proporción de parénquima vivo en las zonas juveniles, factores que favorecen la retención de agua.

Muthike et al. (2022) estudiaron plantaciones de *E. grandis* en Kenia y determinaron que la edad y las condiciones del sitio influyen significativamente en el contenido de humedad inicial. En su investigación, los árboles de nueve años presentaron un contenido de humedad promedio de $147,8 \% \pm 13,6$, mientras que los árboles de catorce años registraron valores promedio inferiores ($114,3 \% \pm 9,3$). Los autores atribuyen esta diferencia a la reducción progresiva de la proporción de albura y al aumento de densidad de la madera con la edad, factores que limitan la capacidad de almacenamiento de agua.

En condiciones de equilibrio higroscópico (20 °C y 74 % de humedad relativa), Calonego et al. (2014) determinaron que el contenido de humedad de equilibrio en *E. grandis* sin tratamiento térmico fue de 10,9 % en la madera juvenil y 11,1 % en la madera madura. Estos valores evidencian una leve variación entre las distintas zonas del fuste, aunque reflejan la tendencia general del material a estabilizarse en torno al 11 % de humedad bajo condiciones ambientales normales.

La madera joven de *Eucalyptus grandis* presenta contenidos de humedad verde más elevados, los cuales disminuyen progresivamente con la edad y madurez del tejido. Por otra parte, el contenido de equilibrio se mantiene relativamente constante, en torno al 11 %. Estas diferencias son relevantes para los procesos de secado, almacenamiento y uso industrial de la especie, ya que determinan la velocidad de secado y condicionan el comportamiento dimensional y mecánico de la madera.

2.2.3.2. Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas más relevantes en la caracterización de la madera y en la evaluación del rendimiento de las plantaciones forestales. Al ser la madera un material poroso, se distinguen diferentes formas de densidad según se considere o no el volumen ocupado por los espacios celulares y la cantidad de agua contenida en el material. La densidad real corresponde a la densidad de la pared celular, descontando en el volumen y todos los espacios huecos. El valor de la densidad real es constante y permanece en alrededor de 1,53 a 1,56 g/cm³ en todas las especies (Spavento et al., 2008, como se cita en Fagúndez Pivetta, 2021).

La densidad aparente básica se define como la relación entre la masa de la madera seca y el volumen en estado saturado. Esta propiedad permite comparar materiales en condiciones uniformes y representa un indicador esencial del comportamiento físico y tecnológico de la madera, ya que se relaciona con su durabilidad, rendimiento industrial y resistencia mecánica (Zobel & Van Buijtenen, 1989). En general, las maderas de mayor densidad presentan una resistencia superior, aunque su procesamiento implica mayores demandas energéticas (Zobel & Van Buijtenen, 1989).

La densidad constituye una propiedad de gran relevancia tecnológica, fuertemente asociada al rendimiento y la calidad del producto final. Además, está relacionada con otras propiedades físicas y con el comportamiento mecánico de la madera, en particular la resistencia a flexión (Moreno et al., 2024).

En *E. grandis*, la caracterización de la densidad en clones e híbridos está determinada por la proporción relativa de duramen y albura. Estudios recientes confirman que la densidad de la albura es mayor que la del duramen a lo largo del fuste, independientemente del material genético evaluado (Bulman-Hartkopf et al., 2024).

La densidad básica y su variación radial constituyen parámetros físicos relevantes que influyen en la calidad de la madera. Trabajos regionales indican que *E. grandis* presenta valores de densidad básica de 0,38 - 0,52 g·cm⁻³ en plantaciones comerciales, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren buena trabajabilidad y resistencia moderada (Elissetche et al., 2024). Estos valores tienden a incrementarse con la edad del árbol y desde la médula hacia la corteza, reflejando una mayor densidad en la madera adulta o externa (Elissetche et al., 2024). Además, en los eucaliptos se observa una tendencia general, la densidad y la proporción de duramen aumentan con la edad y con el desarrollo radial del fuste (Elissetche et al., 2024). En consecuencia, la gestión del turno de corte y del espaciamiento influye directamente en la proporción de madera de mayor calidad, con mayor densidad y contenido de duramen, que puede extraerse en un monte (Elissetche et al., 2024).

La densidad corriente de la madera, se define como la relación entre la masa y el volumen determinados en un mismo estado de humedad, sin corrección al estado anhidro. Cuando esta propiedad se determina a un contenido de humedad del 12%, se expresa como densidad corriente al 12%, condición que se adopta como referencia estándar para la evaluación y comparación de las propiedades físico-mecánicas de la madera bajo condiciones habituales de uso (Glass & Zelinka, 2010; Tsoumis, 1991). Esta referencia resulta ampliamente aceptada en la bibliografía especializada (Glass & Zelinka, 2010; Tsoumis, 1991). A diferencia de la densidad básica, la densidad corriente

incorpora los efectos de la contracción volumétrica y del contenido de humedad del material, por lo que resulta especialmente adecuada para interpretar el comportamiento mecánico de la madera en servicio.

El contenido de humedad del 12 % es ampliamente utilizado como estado de referencia en ensayos tecnológicos de la madera, ya que representa condiciones de equilibrio higroscópico habituales en ambientes templados y permite comparar resultados entre especies, edades y sitios de crecimiento (Glass & Zelinka, 2010).

Además, la mayoría de las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad y el módulo de rotura, se reportan a este nivel de humedad (Glass & Zelinka, 2010).

Los estudios de caracterización tecnológica realizados en Uruguay indican que la densidad corriente al 12 % de humedad de la madera de *Eucalyptus grandis* se ubica generalmente en un rango aproximado de 550 a 650 kg/m³, dependiendo de la edad del rodal, la posición radial dentro del fuste, la calidad de sitio y el material genético utilizado (Pérez del Castillo, 2001).

En particular, trabajos desarrollados por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) y tesis de grado de la Universidad de la República reportan valores medios cercanos a 580–620 kg/m³ al 12 %, con una tendencia creciente desde la médula hacia la corteza, asociada al proceso de maduración del tejido leñoso y al incremento de la proporción de madera adulta (Doldán, 2003; Olivera Benavídez & Cárdenas Rodríguez, 2007; Pérez del Castillo & Venturio Cammarota, 2003).

Estos valores permiten clasificar a *Eucalyptus grandis* como una especie de densidad media, con buen potencial para usos estructurales y productos sólidos de mayor valor agregado, siempre que se considere la variabilidad intra e interarbórea característica de la especie (Zobel & Van Buijtenen, 1989).

2.2.3.3. Anisotropía

La anisotropía en la madera es la relación entre las contracciones tangenciales y radiales bajo las mismas condiciones de contenido de humedad. Este parámetro refleja la diferencia en el comportamiento dimensional del material durante el secado. El valor ideal del coeficiente anisotrópico sería 1, lo que indicaría una contracción idéntica en ambas direcciones. Cuanto mayor sea el coeficiente, mayores dificultades se presentan durante el proceso de secado (Doldán, 2003).

Según Doldán (2003), la anisotropía se manifiesta en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, que dependen de la orientación de las fibras, los anillos de crecimiento y los radios leñosos. Esta variabilidad direccional (longitudinal, radial y

tangencial) debe considerarse en el estudio del material, ya que se puede observar en la distribución de densidad entre el duramen y la albura en sentido radial, pero no el longitudinal.

En relación a las propiedades mecánicas, la resistencia y la rigidez de la madera son considerablemente mayores en la dirección longitudinal que en las direcciones radial o tangencial. Asimismo, el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) dependen directamente de la dirección de la carga aplicada. Este comportamiento se evidencia en los ensayos de flexión en tres puntos, en los cuales las normas especifican la posición del cuerpo de prueba y la dirección de las cargas, con el fin de garantizar la correcta interpretación del comportamiento estructural del material (Bodig & Jayne, 1982; Tsoumis, 1991).

2.2.3.4. Higroscopicidad y estabilidad dimensional

La madera es un material higroscópico, lo que implica que tiene la capacidad de intercambiar humedad con el ambiente. Este proceso provoca variaciones dimensionales en respuesta a los cambios en la humedad relativa del aire, lo cual puede generar problemas de alabeos, rajaduras o deformaciones en productos terminados cuando los procesos de secado y almacenamiento no se controlan adecuadamente. La contracción se produce cuando el contenido de humedad desciende por debajo del punto de saturación de fibras, y no ocurre de forma uniforme. Esta es mínima en dirección longitudinal y máxima en la tangencial. Esta anisotropía dimensional debe considerarse en los procesos de secado y en la utilización final del material (Siau, 1995).

En Uruguay, García Freire y Tarigo Scremini (2006) evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de madera de *E. grandis* en plantaciones de Durazno y Rivera. Aunque el enfoque principal del estudio se centró en el comportamiento mecánico, incluyó valores de densidad básica y contenido de humedad en sentido radial y vertical. Los resultados mostraron un incremento progresivo de la densidad básica desde la corteza, asociado al pasaje de madera juvenil a madera adulta, y un patrón axial con mayores valores en la base del fuste. Además, se observaron correlaciones significativas entre densidad, módulo de elasticidad y módulo de rotura, lo que confirma la relevancia de la densidad como indicador de calidad estructural. Adicionalmente, se determinaron diferencias entre sitios, lo que sugiere la influencia de factores ambientales y silviculturales sobre las propiedades físicas de la madera.

En Argentina, Moreno et al. (2024) analizaron las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* en plantaciones del sudeste de la provincia de Buenos Aires, con el objetivo de evaluar la influencia de la edad y la calidad del sitio sobre las

propiedades mencionadas. Los autores obtuvieron un valor de densidad básica promedio de 699 kg/m^3 , un porcentaje de duramen del 54 % y un coeficiente de anisotropía de 1,6, valores que indicaron una adecuada estabilidad dimensional. Los autores señalaron que la edad y la calidad de sitio influyeron significativamente sobre estas propiedades, aunque con variabilidad controlada. Adicionalmente, el trabajo incluyó ensayos mecánicos complementarios, identificando correlaciones positivas entre la densidad y la resistencia, lo que refuerza la importancia de las propiedades físicas como indicadores de calidad de la madera.

Bulman Hartkopf et al. (2021) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar la variación radial y axial de la densidad de la madera en materiales genéticos de *Eucalyptus grandis* y sus híbridos, en un ensayo de once años de edad en la localidad de Leandro N. Alem, en la provincia de Misiones. El material genético analizado incluyó dos clones puros de *E. grandis* (EG INTA 157 y EG INTA 36) y tres híbridos interespecíficos (*E. grandis* × *E. camaldulensis* y *E. grandis* × *E. tereticornis*). Para ello, se determinaron la densidad básica, estacionada, anhidra y saturada en distintas posiciones radiales (de médula a corteza) y a diferentes alturas del fuste: 0,10 m; 2,65 m; y 5,50 m.

Los resultados indicaron un comportamiento consistente entre la mayoría de los clones y sus híbridos, evidenciando un incremento radial de la densidad, con valores más elevados hacia la periferia en comparación con la zona central del fuste. Este comportamiento se asocia al desarrollo de madera de transición y adulta, caracterizada por una mayor densidad respecto a la madera juvenil. Estos resultados refuerzan la importancia de considerar la posición radial del material en la planificación de los aprovechamientos industriales, ya que puede influir directamente en la calidad final de los productos obtenidos. En cuanto a la variación axial, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las tres alturas evaluadas, lo que sugiere una distribución homogénea de la densidad a lo largo del fuste. Esta estabilidad axial representa una ventaja para el procesamiento industrial, ya que reduce la necesidad de segmentar el fuste por niveles de calidad o resistencia. Además, los híbridos presentaron valores de densidad superiores y más uniformes que los clones puros, lo que sugiere un mejor desempeño para aplicaciones que requieren resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Por su parte, uno de los clones puros (EG INTA 157) presentó un comportamiento atípico, con un patrón radial menos definido, lo que podría hacerlo más adecuado para usos específicos que requieran menor densidad (Bulman Hartkopf et al., 2021).

Oberschelp et al. (2007) evaluaron plantaciones de *Eucalyptus grandis*, *E. dunnii* y *E. saligna* en la localidad de Concordia, provincia de Entre Ríos. El objetivo principal del

estudio fue comparar la densidad y la dureza de sus maderas. Los resultados indicaron que *E. grandis* presentó menores valores de densidad y dureza, junto con un bajo índice de rajado y una menor presencia de defectos en las tablas aserradas. El estudio concluyó que, si bien *E. dunnii* y *E. saligna* poseen maderas más densas y duras, condición que las hace más aptas para usos que demandan elevada resistencia mecánica, *E. grandis* se destacó por exhibir un menor índice de rajado y menor presencia de defectos en las tablas aserradas. Esto sugiere que *E. grandis* presentó mejor estabilidad dimensional y calidad superficial, características que la hacen adecuada para aplicaciones donde la uniformidad del material y el acabado visual resultan prioritarios.

En conjunto, estos estudios confirman que la madera presenta una elevada variabilidad dimensional, influida por su estructura anatómica, las variaciones en el contenido de humedad y la posición en el fuste. Esta evidencia subraya la necesidad de aplicar normas estandarizadas para su caracterización, a fin de garantizar la uniformidad, comparabilidad y precisión en la evaluación de sus propiedades físicas.

2.2.4. Propiedades mecánicas de *E. grandis*

Eucalyptus grandis es una de las especies de mayor relevancia dentro de las plantaciones forestales uruguayas, especialmente por su destino en la producción de madera aserrada (DGF, 2024). Estas plantaciones suelen ser manejadas mediante podas y raleos sucesivos con el objetivo de obtener fustes rectos, de gran diámetro y con baja presencia de nudos, adecuados para producir madera de calidad. La caracterización de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la especie resulta fundamental para su aprovechamiento industrial y comercial, tanto para el mercado interno como en el de exportación, ya que permite definir sus potenciales usos, mejorar el rendimiento productivo y acceder a mercados con mayores exigencias tecnológicas (Pérez del Castillo, 2001). Asimismo, contar con información técnica confiable sobre estas propiedades contribuye a optimizar el aprovechamiento del recurso forestal y orientar su aplicación en función de las características del material. Actualmente, las normas y requerimientos utilizados para evaluar la madera provienen mayormente de estándares europeos y americanos, por lo que resulta necesario caracterizar la madera producida en Uruguay bajo sus propias condiciones de crecimiento y desempeño estructural.

En este contexto, el estudio de las propiedades mecánicas de la madera resulta esencial para comprender su capacidad de resistir esfuerzos externos y, por lo tanto, definir sus posibles aplicaciones en la construcción, en el diseño estructural y en la fabricación de

productos. Estas propiedades determinan la estabilidad y seguridad de las estructuras, lo cual permite caracterizar diferentes especies de madera y aportar parámetros fundamentales para el cálculo de proyectos de ingeniería y arquitectura.

Para Bodig y Jayne (1982), las propiedades mecánicas se refieren al comportamiento de la madera frente a cargas o esfuerzos aplicados. Entre los conceptos más importantes se encuentran la fuerza, que es la capacidad de producir movimiento o deformación; la carga, que representa la magnitud del esfuerzo aplicado; y el esfuerzo unitario, definido como la fuerza por unidad de superficie (Bodig & Jayne, 1982).

La deformación es el cambio dimensional que experimenta la madera al aplicarle una carga, mientras que la elasticidad es la capacidad de la madera de recuperar su forma original una vez retirada la carga. Dentro de los parámetros más relevantes se destacan el módulo de elasticidad (MOE), que mide la rigidez del material, y el módulo de rotura (MOR), que representa el esfuerzo máximo que puede soportar antes de fracturarse (Pérez del Castillo, 2001; Tuset & Durán, 1979).

La madera se caracteriza por ser un material anisotrópico, es decir, sus propiedades varían según la dirección del esfuerzo aplicado. Las direcciones principales de evaluación corresponden a los ejes longitudinal, radial y tangencial. La variabilidad en el comportamiento mecánico depende de factores como la especie, el contenido de humedad, la densidad, las condiciones de crecimiento, la orientación de las fibras y la presencia de defectos como nudos o rajaduras. Además, las condiciones de ensayo influyen significativamente en los resultados, ya que parámetros como la velocidad de aplicación de la carga, la temperatura o la duración del esfuerzo afectan la respuesta del material. En general, un mayor contenido de humedad disminuye la resistencia de la madera, mientras que un aumento de la densidad tiende a mejorar propiedades como la compresión, la flexión o la resistencia perpendicular a la fibra. La desviación de las fibras, la presencia de defectos y el envejecimiento en servicio reducen también la capacidad resistente de la madera (Doldán, 2003; García Freire & Tarigo Scremini, 2006; Pérez del Castillo, 2001).

Las propiedades mecánicas de la madera se clasifican según el tipo de carga aplicada. La resistencia estática se evalúa mediante cargas aplicadas lentamente, como en los ensayos de flexión, compresión, corte y tracción. Por otro lado, la resistencia dinámica se mide aplicando cargas instantáneas que permiten estimar la tenacidad y fragilidad del material (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026; Pérez del Castillo, 2001). Finalmente, las propiedades de dureza o desgaste indican la resistencia de la madera a la penetración de cuerpos duros, característica esencial en superficies expuestas a usos

intensivos, como pisos y revestimientos (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026; Pérez del Castillo, 2001).

La determinación de estas propiedades se realiza a través de diversos tipos de ensayos. En el caso de la flexión estática, se obtiene el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) utilizando probetas libres de defectos o vigas de dimensiones estructurales. Los ensayos de compresión, tanto paralela como perpendicular a la fibra, permiten evaluar la resistencia de la madera frente a cargas en diferentes direcciones. El ensayo de cizallamiento o corte paralelo analiza la capacidad del material de resistir fuerzas que provocan el deslizamiento entre secciones adyacentes, mientras que el ensayo de clavaje o hendidura estudia la resistencia al rajado, aspecto relevante para uniones con conectores. Por último, los ensayos de tracción aportan información sobre la resistencia de la madera frente a cargas de estiramiento, tanto paralelas como perpendiculares a la fibra (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026; Pérez del Castillo, 2001).

La evaluación de las propiedades puede realizarse mediante ensayos destructivos o métodos no destructivos. Entre los primeros se incluyen normas internacionales como ASTM D198, JIS Z 2113, IRAM o EN 408 (Pérez del Castillo, 2001). Por otro lado, los métodos no destructivos utilizan técnicas basadas en ultrasonido, vibraciones o instrumentos especializados (por ejemplo, Sylvatest, Fakopp y FFT Analyzer). Estos métodos no destructivos permiten estimar la resistencia y rigidez de la madera sin dañarla (Pérez del Castillo, 2001). Según los autores, estas técnicas resultan especialmente útiles para la clasificación estructural y la evaluación de piezas en servicio. La madera destinada a aplicaciones estructurales debe clasificarse en categorías resistentes de acuerdo con normas como EN 384 y EN 338. Esta clasificación puede realizarse de manera visual, considerando defectos visibles, o mediante ensayos mecánicos, que incluyen tanto procedimientos destructivos como no destructivos. Este proceso garantiza la confiabilidad del material y la eficiencia en el diseño y construcción de estructuras de madera (Pérez del Castillo, 2001).

Asimismo, el conocimiento de las propiedades mecánicas de la madera tiene una relevancia científica, tecnológica y económica. Desde la perspectiva científica, permite caracterizar distintas especies y comprender su comportamiento estructural. En el ámbito tecnológico, contribuye a predecir el desempeño de la madera en diversas condiciones de uso. Desde la perspectiva económica, favorece la optimización de recursos y la selección de materiales adecuados para cada tipo de uso. En síntesis, el estudio de las propiedades mecánicas constituye un pilar esencial para el aprovechamiento eficiente y sostenible de la madera en construcción y diseño estructural.

En Uruguay, diversos estudios han permitido comparar las propiedades mecánicas de especies forestales como *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* y *Eucalyptus grandis*, con materiales de referencia provenientes del exterior (Pérez del Castillo & Venturio Cammarota, 2003). Los resultados indican que las maderas nacionales presentan valores competitivos de módulo de elasticidad y módulo de rotura respecto a especies importadas, lo que las convierte en recursos viables para aplicaciones estructurales (Pérez del Castillo & Venturio Cammarota, 2003).

La clasificación de la madera según sus propiedades físicas y mecánicas, mediante el análisis de probetas pequeñas libres de defectos, constituye una práctica consolidada en la evaluación de especies forestales. Esta metodología ha sido necesaria debido a la alta variabilidad intrínseca del material, las diferencias entre especies y los múltiples factores que influyen en los resultados de los ensayos, además de las exigencias cambiantes en el mercado (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026).

Por otra parte, una de las formas de establecer las propiedades mecánicas de las maderas a través de la clasificación visual consiste en ajustar los resultados obtenidos en probetas libres de defectos mediante factores de corrección apropiados, que permitan su aplicación en piezas estructurales de dimensiones reales (Ley n° 15.939, 1987).

En Uruguay se han desarrollado múltiples estudios (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2", 2004) orientados a la caracterización de las propiedades mecánicas de *E. grandis*. El Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2" (2004) evaluó las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis* de aproximadamente 18 años de edad, procedente del norte del país. Los autores registraron valores de densidad básica, contenido de humedad, módulo de elasticidad (obtenido mediante métodos no destructivos) y módulo de rotura por flexión estática. Estas mediciones se realizaron en tablas y probetas representativas, abarcando variaciones desde la médula hacia la corteza y a lo largo de la altura del fuste. Estos resultados destacan la importancia de estudiar la madera en distintas condiciones de crecimiento y edad, con el fin de orientar su aprovechamiento industrial y su clasificación estructural.

Asimismo, investigaciones más recientes evidencian el potencial de la madera uruguaya para usos estructurales. Moya et al. (2019) demostraron que vigas laminadas encoladas de *E. grandis* producidas en Uruguay cumplen con los requisitos de la clase resistente GL24h según la norma europea EN 14080, confirmando su aptitud para aplicaciones estructurales de alto desempeño. Por su parte, Olivera Benavídez y Cárdenas

Rodríguez (2007) analizaron tablas de 50 × 150 mm de *E. grandis* de 26 años, provenientes del departamento de Durazno, determinando densidad, contenido de humedad, módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión estática. Además, evaluaron la variación radial y axial de dichas propiedades.

Moya et al. (2019) observaron un incremento significativo de la densidad, el MOE y el MOR desde la médula hacia la corteza, así como una variación axial moderada entre la base y la copa. Este comportamiento responde a la transición desde madera juvenil hacia madera adulta y explica la mayor aptitud estructural del material ubicado en las zonas externas del fuste, lo que resalta la necesidad de considerar la variabilidad interna de la madera en los procesos de clasificación resistente y en el diseño estructural.

2.2.5. Módulo de elasticidad y módulo de rotura

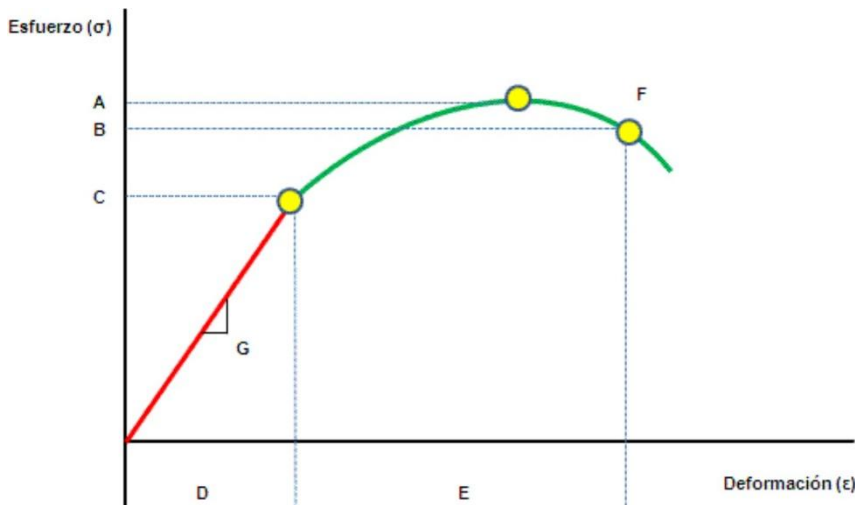
El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) constituyen las propiedades mecánicas más importantes en el estudio de maderas destinadas a soportar cargas estructurales. Ambos parámetros reflejan la capacidad del material para resistir esfuerzos y deformaciones bajo condiciones controladas de ensayo.

El módulo de elasticidad expresa la relación entre el esfuerzo aplicado por unidad de superficie y la deformación unitaria por unidad de longitud (Tuset & Durán, 1979).

Cuanto mayor es el valor, mayor es la rigidez de la madera (se deforma menos ante una carga dada). El módulo de rotura es el esfuerzo máximo que una probeta puede resistir antes de fracturarse. En el comportamiento de la madera, la zona elástica se rige por la Ley de Hooke, la cual establece que la deformación unitaria es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Esta zona corresponde al intervalo comprendido entre el 10% y el 40% de la carga máxima que soporta el material, como se observa en la figura 2, en la zona 1 (Hoadley, 2000).

Figura 2

Gráfica de carga y deformación con zonas delimitadas de comportamiento del material



Nota. Adaptado de Muñoz-Acosta (2012). La gráfica presenta varias zonas y puntos marcados. Se describe el diagrama de esfuerzo (σ) vs deformación (ϵ) cómo: **A**: Esfuerzo último o máximo. **B**: Esfuerzo de ruptura (MOR). **C**: Resistencia de fluencia o Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP). **D**: Zona elástica (deformación reversible). **E**: Zona plástica (deformación permanente). **F**: Punto de ruptura o fractura. **G**: Pendiente se cumple que $\sigma=\epsilon$ y el MOE se puede calcular por la Ley de Hooke.

El MOE presenta una fuerte correlación con el MOR (Pérez del Castillo et al., 2000), lo que evidencia que la rigidez y la resistencia en flexión están estrechamente vinculadas. Ambas propiedades se determinan mediante el ensayo de flexión estática, que consiste en aplicar una carga puntual en el centro de una viga apoyada en sus extremos, registrando la relación entre carga y deformación. Este método permite evaluar la resistencia y rigidez de la madera frente a esfuerzos de flexión. La velocidad de aplicación de la carga se encuentra especificada en las normas técnicas correspondientes, con el fin de reproducir condiciones comparables a las de una carga estática.

Estudios realizados en tablas de madera de *Eucalyptus grandis* de $50 \times 150 \times 2800$ mm³, procedente del centro de Uruguay, registraron valores de MOE de 11.588 MPa, MOR de 46 MPa y una densidad de 504 kg/m³ (Instituto de Estructuras y Transporte [IET], 2014). Sin embargo, estas propiedades presentan variaciones significativas entre especies, e incluso dentro de una misma especie, debido a factores como la densidad de la madera, el contenido de humedad, la orientación de las fibras y las condiciones de crecimiento.

2.3. Madera juvenil y madera adulta

La madera de *Eucalyptus grandis* presenta variaciones significativas en sus propiedades anatómicas, físicas y mecánicas a lo largo del radio del fuste, particularmente entre la madera juvenil y la madera adulta. La madera juvenil se localiza en las proximidades de la médula y corresponde a los primeros años de crecimiento, mientras que la madera adulta se forma en anillos externos luego de una etapa de transición cuya duración depende del sitio y del manejo aplicado. Esta diferenciación tiene implicancias directas en la calidad y en los posibles usos industriales de la madera (Palermo et al., 2015; Wilkins, 1997, como se cita en Cherelli et al., 2018).

En términos anatómicos y físicos, la madera juvenil se caracteriza por presentar menor densidad básica, fibras más cortas y paredes celulares más delgadas, en comparación con la madera adulta. Estas diferencias reflejan un patrón radial donde la densidad aumenta hacia la corteza, fenómeno ampliamente documentado en plantaciones de *E. grandis* en Sudamérica (Palermo et al., 2015; Resquin et al., 2024; Wilkins, 1997, como se cita en Cherelli et al., 2018). Además, la madera juvenil presenta un mayor ángulo microfibrilar (MFA), lo que implica una orientación más inclinada de las microfibrillas respecto del eje longitudinal, mientras que en la madera adulta este ángulo disminuye progresivamente (Hein et al., 2013).

Estas características anatómicas y físicas influyen directamente en el comportamiento mecánico de la madera. Un mayor MFA y una menor densidad se asocian con valores reducidos de módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR), disminuyendo la rigidez y la resistencia de la madera juvenil respecto a la adulta (Hein et al., 2013; Resquin et al., 2024). Estudios desarrollados en Brasil y Uruguay confirman esta tendencia, observándose una mejora gradual de las propiedades mecánicas a medida que aumenta la proporción de madera adulta en el fuste (Palermo et al., 2015; Resquin et al., 2024).

La madera juvenil presenta menor estabilidad dimensional, debido a la combinación entre baja densidad y mayor MFA, lo que incrementa la contracción y la variabilidad durante el secado y procesamiento. Por el contrario, la madera adulta, con una estructura más compacta y homogénea, exhibe mayor estabilidad y mejores propiedades tecnológicas, reflejando un comportamiento más predecible frente a cambios de humedad (Batista et al., 2018; Hein et al., 2013). Esta diferencia explica que, en aplicaciones estructurales, la madera juvenil sea menos adecuada y requiera una clasificación más rigurosa o tratamientos compensatorios para garantizar su desempeño.

En cuanto a los usos industriales, la madera juvenil de *E. grandis* suele destinarse principalmente a la producción de pulpa y papel, biomasa energética y productos de ingeniería de baja exigencia mecánica. Su menor densidad y mayor variabilidad limitan su aplicación directa en usos estructurales, aunque puede integrarse en productos compuestos como tableros, LVL o CLT si se clasifica y procesa adecuadamente (Hein et al., 2013; Palermo et al., 2015). Es por eso que plantaciones de *E. grandis* de 9, 10 y 11 años representan fines no estructurales sino que principalmente para pulpa. En contraste, la madera adulta, por su mayor densidad, rigidez y estabilidad, se utiliza con mayor frecuencia en aserrado, maderas estructurales, pisos, muebles y productos de alto valor agregado (Batista et al., 2018; Resquin et al., 2024).

En los sistemas productivos de Uruguay, Brasil y Argentina, donde predominan las plantaciones de corta rotación, la proporción de madera juvenil en los rollizos suele ser elevada, lo que afecta la homogeneidad de la materia prima al aserrado y a los productos de ingeniería. Diversos estudios destacan que incrementar la edad de cosecha o aplicar manejos silvícolas, como raleos puede elevar la proporción de madera adulta, mejorando así la calidad mecánica y el valor agregado del producto final (Palermo et al., 2015; Resquin et al., 2024).

2.4. Madera de tensión

En angiospermas como *Eucalyptus grandis*, la inclinación del fuste causada por viento, carga asimétrica o búsqueda de luz induce la formación de madera de tensión en el fuste del árbol, como respuesta para corregir su posición (Savidge, 2003). Esta madera se caracteriza por la presencia de capa gelatinosa (G-layer) en la pared celular, que provoca mayor contracción longitudinal, variaciones en densidad y un incremento localizado de rigidez respecto a la madera normal (Donaldson, 2008; Washusen & Ilic, 2001). No obstante, su presencia puede generar deformaciones indeseadas durante el secado o el uso final —como fisuras no deseadas, rajaduras o torceduras— afectando la calidad estructural del producto final (Piter, 2003). En plantaciones comerciales de *E. grandis*, la madera de tensión es frecuente en árboles jóvenes o con fustes desviados, y puede contribuir a la variabilidad radial del MOE/MOR observada entre zonas cercanas a la médula y la corteza (Washusen & Ilic, 2001).

2.5. Clasificación visual de la madera

La clasificación visual es uno de los métodos más utilizados para determinar la calidad y el uso estructural de la madera. Se basa en la observación y evaluación de defectos visibles, tales como nudos, desviaciones de fibra, rajaduras o fendas, los cuales pueden

originarse en el crecimiento del árbol o durante las etapas de aserrado y secado. Estos defectos influyen directamente en la resistencia y durabilidad del material, por lo que su identificación y cuantificación resultan esenciales para garantizar la seguridad en su uso (Barreiro & Hirsch, 2011).

El principio de este método radica en la correlación existente entre las características visuales y las propiedades mecánicas. Piter (2003) desarrolló un método de clasificación por resistencia para la madera de *Eucalyptus grandis* en Argentina, a partir del cual se establecieron clases visuales estandarizadas. Estas clases se definen mediante límites específicos para cada defecto, los cuales reflejan su impacto en parámetros como el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR). Entre los defectos evaluados, los nudos son de particular importancia. Su tamaño, cantidad y ubicación afectan la resistencia de la madera, especialmente frente a esfuerzos de tracción paralela a las fibras, siendo su influencia menor en compresión y flexión. Esto ocurre porque la madera que rodea al nudo presenta una orientación irregular de las fibras y un ángulo microfibrilar distinto, lo que disminuye la capacidad resistente de la pieza. En consecuencia, la clasificación visual constituye una herramienta fundamental para estimar el desempeño estructural de la madera y optimizar su aprovechamiento industrial.

2.6. Métodos destructivos y no destructivos

El conocimiento del módulo de elasticidad y del módulo de rotura resulta fundamental para ampliar los usos de la madera e incrementar su competitividad en mercados estructurales. La obtención de estos parámetros puede realizarse mediante métodos destructivos o no destructivos, según la naturaleza del ensayo y el tipo de información buscada.

Los métodos destructivos constituyen la referencia principal o “método testigo”, ya que permiten verificar directamente el comportamiento de la madera hasta su rotura. Estos ensayos se realizan en una Máquina Universal de Ensayos (MUE), la cual mide la carga aplicada y la correspondiente deformación del material. A partir de estos datos se calculan los valores de MOE y MOR.

En Uruguay, la mayor parte de los ensayos mecánicos en piezas y productos de madera, se realizan en el LATU utilizando una máquina Minebea, modelo AL-250 kNB, donada por la agencia japonesa JICA en el marco del “Proyecto de Tecnología de Ensayos de Productos Forestales”. Este equipo permite realizar ensayos con probetas pequeñas libres de defectos, así como con piezas estructurales de mayor tamaño, seleccionando capacidades de carga de 50, 100 o 250 kN según el tipo de prueba (Pérez del Castillo, 2001).

Según el ASTM International (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026), el procedimiento generalmente se rige por la norma ASTM D143-14 “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”, norma americana para el uso de la máquina universal. También pueden aplicarse normas europeas en el uso de la misma. En cuanto a su uso, la norma establece las dimensiones de las probetas (25 × 25 × 410 mm), el contenido de humedad de equilibrio, la posición de la pieza (con la cara más próxima a la médula hacia abajo) y una velocidad de carga de 2,5 mm/min (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026). Además, la norma exige una descripción visual del tipo de rotura y recomienda realizar las mediciones dentro del rango elástico comprendido entre el 10 % y el 40 % de la carga máxima (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026).

Por otro lado, los métodos no destructivos permiten inferir las propiedades mecánicas de la madera sin provocar daño en el material, lo que los convierte en herramientas especialmente valiosas para la evaluación de piezas en servicio, el control de calidad industrial y la clasificación estructural. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran los métodos basados en vibraciones inducidas, los ensayos sínicos y los ensayos ultrasónicos, todos ellos fundamentados en la medición de la velocidad de propagación de ondas longitudinales a través del material (Pérez del Castillo et al., 2000; Wang & Carter, 2015).

El método sínico, representado por equipos como el Fakopp, determina la velocidad de propagación de ondas longitudinales generadas mediante un impacto mecánico. En este procedimiento, se colocan sensores en los extremos de la probeta y se aplica un golpe con un martillo metálico; el equipo registra el tiempo de tránsito de la onda y, a partir de la longitud conocida de la pieza, calcula la velocidad de propagación (V). A partir de este parámetro y de la densidad de la madera, se estima el módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}), el cual se asocia directamente con la rigidez del material (Bodig & Jayne, 1982; Pérez del Castillo et al., 2000).

En el caso de *Eucalyptus grandis*, estudios realizados en Uruguay en el marco del proyecto LATU–JICA reportaron valores de velocidad de propagación longitudinal comprendidos, en general, entre 3.500 y 4.500 m/s, con módulos de elasticidad dinámicos que mostraron una alta correlación con el módulo de elasticidad estático (MOE) obtenido mediante ensayos de flexión (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto “GT2”, 2004).

Estos trabajos evidencian que el método sínico permite discriminar adecuadamente piezas de distinta calidad estructural, aun considerando la variabilidad propia de la

especie (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2", 2004; Pérez del Castillo, 2001).

El Sylvatest, por su parte, emplea un sistema ultrasónico que genera ondas de alta frecuencia sin necesidad de impacto físico, midiendo el tiempo de propagación entre sensores ubicados en la pieza. Este método presenta una elevada repetibilidad y una menor dependencia del operador, siendo ampliamente utilizado en estudios experimentales y aplicaciones industriales (Olivera Benavídez & Cárdenas Rodríguez, 2007). Ensayos desarrollados por el LATU y por investigaciones académicas en Uruguay y Argentina han mostrado que los valores de velocidad ultrasónica en *Eucalyptus grandis* se ubican en rangos similares a los obtenidos por métodos sónicos, y que las estimaciones de rigidez dinámica presentan correlaciones significativas con los valores de MOE medidos en laboratorio (Olivera Benavídez & Cárdenas Rodríguez, 2007).

Asimismo, investigaciones realizadas sobre madera estructural de *Eucalyptus grandis* en la región indican que los valores de módulo de elasticidad dinámico obtenidos mediante métodos no destructivos suelen ser ligeramente superiores a los valores estáticos, debido a la ausencia de efectos plásticos y a las diferencias en el modo de sollicitación del material (Bodig & Jayne, 1982; Wang & Carter, 2015). No obstante, la relación entre ambos parámetros resulta suficientemente estable como para permitir el uso de estos métodos en procesos de clasificación estructural y selección de material para usos de mayor exigencia mecánica (Bodig & Jayne, 1982; Galligan et al., 2015).

En conjunto, los resultados disponibles confirman que los métodos no destructivos constituyen una herramienta confiable para la evaluación de la calidad mecánica de la madera de *Eucalyptus grandis* en Uruguay, permitiendo integrar información sobre rigidez, variabilidad interna y efectos del sitio y del crecimiento, sin comprometer la integridad de las piezas analizadas.

Eucalyptus grandis considerada como una especie de rápido crecimiento con creciente relevancia en la industria maderera del Cono Sur; ha mostrado valores de módulo de elasticidad superiores a los del pino, lo que indica un desempeño estructural competitivo bajo condiciones de rotación similares (Spavento et al., 2008, como se cita en Fagúndez Pivetta, 2021). Además, la aplicación de herramientas como el *Microsecond Timer* y el *Sylvatest* en *Eucalyptus grandis* ha permitido evaluar su calidad estructural, detectar defectos internos y verificar su idoneidad para aplicaciones en construcción sostenible (Bucur, 1995; Wang & Carter, 2015).

2.7. Manejos silviculturales para madera de calidad

2.7.1. Manejo de sitio

El manejo silvícola desempeña un papel fundamental en la producción de madera de calidad. Las propiedades físicas y mecánicas de la madera pueden verse influenciadas por factores genéticos y ambientales, por las características del sitio, así como por las prácticas de manejo aplicadas durante el crecimiento del rodal, entre ellas la ejecución de podas, raleos, y la definición del turno de cosecha final. Al momento de establecer una plantación, el análisis detallado del sitio constituye un aspecto determinante para asegurar el adecuado desarrollo del cultivo.

El sitio, entendido como el conjunto de factores edáficos, climáticos y topográficos que condicionan la productividad de una plantación forestal, ejerce una influencia directa sobre variables fundamentales como el diámetro, la altura dominante, la calidad de fuste y la tasa de acumulación de biomasa (García Freire & Tarigo Scremini, 2006; Zobel & Van Buijtenen, 1989).

En conjunto, estas diferencias confirman que el sitio debe entenderse como una unidad integrada que incluye factores edáficos, climáticos y topográficos, los cuales interactúan de forma compleja y determinan el potencial productivo de cada rodal. Por ende, las diferencias de crecimiento observadas entre los árboles de diferentes edades no pueden atribuirse exclusivamente a la edad, sino que responden a la combinación de factores ambientales propios de cada predio, siendo necesaria su consideración conjunta para una correcta interpretación de los resultados.

Los predios presentan diferencias relevantes en cuanto a características de suelo, drenaje, profundidad efectiva, textura y régimen hídrico, factores que determinan la disponibilidad de agua y nutrientes para el desarrollo de los árboles. Los sitios con suelos profundos, bien drenados y con mayor capacidad de retención hídrica favorecen un crecimiento más rápido y sostenido, mientras que, en aquellos ambientes con limitaciones físicas o químicas del suelo, el crecimiento se ve restringido, aun cuando el material genético y las prácticas de manejo sean similares (Doldán, 2003).

Crecimientos mayores en madera pueden asociarse además a una mayor expresión del potencial productivo del sitio a medida que el rodal madura, especialmente en ambientes de calidad media a alta. En estos casos, el sistema radical se encuentra más desarrollado, permitiendo un mayor aprovechamiento de los recursos edáficos, lo que se traduce en incrementos acumulados superiores en diámetro y volumen (García Freire & Tarigo Scremini, 2006).

Por otra parte, las diferencias en las condiciones de sitio también pueden incidir en la estructura interna de la madera. En general, ambientes de crecimiento más favorables tienden a generar mayores tasas de crecimiento radial, lo que influye en la proporción de madera juvenil y adulta, en la densidad y, en consecuencia, en las propiedades mecánicas del material. En sitios de menor calidad, el estrés hídrico o nutricional puede producir anillos de crecimiento más estrechos y una mayor heterogeneidad dentro del fuste, afectando la uniformidad de la madera (Palermo et al., 2015; Zobel & Van Buijtenen, 1989).

2.7.2. Manejo de material genético

En plantaciones de *Eucalyptus grandis*, la selección adecuada del material genético constituye un factor esencial para lograr una mayor uniformidad en las propiedades tecnológicas de la madera. Los programas de mejoramiento han permitido seleccionar individuos con características superiores, como una menor ramificación, mayor rectitud del fuste y nudos de menor tamaño, lo que se traduce en una estructura nodal más homogénea y de mejor desempeño industrial (Stackpole et al., 2010). Esta superioridad genética contribuye además a reducir la variabilidad asociada a las condiciones del sitio, manteniendo niveles de calidad estables aún bajo ambientes contrastantes (Raymond, 2002). En Uruguay, el avance del mejoramiento genético ha sido clave para incrementar la productividad y mejorar la calidad de la madera utilizada en aplicaciones de alto valor, optimizando su resistencia mecánica y el rendimiento industrial (Caamaño Lamela & Stirling Estigarribia, 2009; Methol, 2008).

2.7.3. Implementación de podas y raleos

Para la producción de madera de calidad se implementan esquemas de manejo específicos orientados a alcanzar las dimensiones y características deseadas al final del turno. Según Baez Albano (2023), en este tipo de sistemas, los turnos de corte suelen oscilar entre 18 a 30 años. Las plantaciones se establecen con densidades iniciales cercanas a 900 árboles por hectárea, las cuales se reducen progresivamente mediante raleos para disminuir la competencia y favorecer el vigor y la rectitud del fuste (Baez Albano, 2023). A lo largo del ciclo productivo, pueden realizarse entre cuatro y cinco intervenciones para efectuar podas, ya sea de forma manual o mecanizada (Baez Albano, 2023).

El principal objetivo del manejo silvícola en plantaciones destinadas a madera de calidad es maximizar la proporción de duramen. Un distanciamiento entre árboles contribuye a incrementar el diámetro del fuste y, en consecuencia, la proporción de duramen, dado

que la reducción de la competencia mejora el crecimiento y favorece el desarrollo de árboles más altos y vigorosos.

Otras actividades silviculturales, como las podas, presentan un rol determinante, ya que permiten obtener madera libre de nudos (madera clear), mejorar la forma del fuste y reducir la proporción de madera juvenil. En conjunto, estas prácticas condicionan de manera directa la calidad estructural y estética del material, además de optimizar su rendimiento industrial y su valor comercial.

2.8. Correlación entre propiedades físicas y mecánicas

Diversos estudios han analizado la correlación entre la densidad básica y las propiedades mecánicas de la madera, especialmente el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR). García Freire y Tarigo Scremini (2006) reportaron una alta correlación entre la densidad básica y el módulo elástico en madera de *Eucalyptus grandis*.

Otros estudios presentaron una alta correlación entre la densidad corriente y los valores de MOE obtenidos mediante métodos destructivos y no destructivos, así como una relación directa entre el MOE y el MOR; por ejemplo, Pérez del Castillo (2001) determinó, para probetas libres de defectos de *Eucalyptus grandis* ensayadas en flexión estática, coeficientes de correlación de $r = 0,624$ entre densidad básica y MOE, $r = 0,825$ entre densidad y MOR, y $r = 0,895$ entre MOE y MOR. De manera complementaria, el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2" (2004) determinó para MOE y MOR en pequeñas probetas intervalos de correlaciones de 0.60 - 0.71, y rangos de 0,53 a 0,61 y de 0,72 a 0,81 al relacionar la densidad aparente corriente con el MOE y el MOR, respectivamente.

2.9. Modelo de clasificación y regresión

Los modelos de regresión son herramientas estadísticas que permiten describir y cuantificar la relación entre una variable dependiente y una o más variables explicativas, con el objetivo de analizar tendencias, explicar comportamientos y realizar predicciones.

En ciencia aplicada, los modelos de regresión se utilizan para evaluar la influencia simultánea de distintos factores sobre un fenómeno de interés, aportando una base objetiva para la interpretación de resultados experimentales. En el ámbito forestal y tecnológico, son ampliamente utilizados para analizar la variación de propiedades de la madera en función de variables como la edad, la posición radial, el sitio de crecimiento, la densidad o el contenido de humedad (Montgomery et al., 2021).

En Uruguay, los estudios desarrollados por el LATU han documentado que propiedades como el módulo de elasticidad y la resistencia mecánica presentan una elevada variabilidad asociada a factores biológicos y ambientales, lo que justifica el uso de modelos estadísticos para interpretar correctamente los resultados y evitar conclusiones basadas exclusivamente en la edad cronológica del árbol (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2", 2004).

En especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus grandis*, los efectos del sitio, el manejo silvícola y el material genético suelen superponerse, por lo que los modelos de regresión permiten integrar múltiples fuentes de variación y contribuir a una mejor comprensión del comportamiento mecánico de la madera, facilitando su correcta clasificación estructural y su aplicación en sistemas constructivos (Ilic, 2001).

La selección del modelo de regresión apropiado constituye una etapa fundamental para garantizar interpretaciones válidas y resultados confiables. En estudios sobre madera estructural, Pérez del Castillo y Venturio Cammarota (2003) indican que las propiedades mecánicas no dependen de un único factor, sino de la interacción entre edad del árbol, posición radial, densidad, contenido de humedad y condiciones de crecimiento, por lo que se recomienda la utilización de modelos de regresión múltiple que permitan integrar simultáneamente estas variables.

Asimismo, el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2" (2004) destaca que los modelos deben seleccionarse atendiendo no sólo al grado de ajuste estadístico, sino también a su coherencia biológica y tecnológica. Un modelo con alto coeficiente de determinación carece de valor práctico si no representa adecuadamente los mecanismos de formación de la madera o si genera resultados incompatibles con el comportamiento estructural observado.

Por este motivo, los trabajos priorizan aquellos modelos que presentan significancia estadística, estabilidad de los coeficientes y una relación consistente con los procesos de crecimiento y maduración del tejido leñoso, evitando modelos excesivamente complejos que dificulten la interpretación técnica de los resultados (Pérez del Castillo & Venturio Cammarota, 2003). Junto con los modelos de regresión, otras herramientas aplicables como árboles de decisión constituyen una herramienta exploratoria complementaria, ya que permiten identificar relaciones no lineales, interacciones y umbrales críticos entre variables sin imponer supuestos paramétricos. Pueden usarse para aplicar en modelos de Machine Learning o para caracterizar y agrupar de maneras eficientes en base al comportamiento de los datos. Los árboles de decisión constituyen una herramienta de partición recursiva que permite identificar patrones y relaciones entre variables mediante la segmentación jerárquica de los datos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detallan los materiales (materia prima y equipos) y los métodos utilizados a lo largo del trabajo.

3.1. Materiales

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República en conjunto con la empresa Agroforestal (AF), orientado a la evaluación de la madera de *Eucalyptus grandis* proveniente de diferentes sitios y edades de plantación en Uruguay. Para el estudio se seleccionaron tres predios representativos denominados *Burgos*, *Achara* y *Azotea de Ramírez*, ubicados en los departamentos de Treinta y Tres y Cerro Largo, respectivamente (Figura 3).

Los predios Achara, Azotea Ramírez y Burgos difieren no sólo en términos edáficos, sino también en cuanto a condiciones climáticas y ambientales que en conjunto definen la calidad de sitio para el crecimiento forestal, tales como el régimen de precipitaciones, la frecuencia de heladas, la exposición a vientos dominantes, la humedad atmosférica y la topografía.

En el predio Achara, además de presentar condiciones de suelo más favorables, el entorno climático resulta relativamente más benigno para el desarrollo de *Eucalyptus grandis*, con menor exposición a vientos intensos y menores riesgos de heladas tempranas o tardías. Estas condiciones mejoran el efecto sitio y favorecen el desarrollo de la madera.

El predio Azotea Ramírez se caracteriza por condiciones intermedias, tanto edáficas como climáticas. Si bien no se encuentra entre los sitios más restrictivos, presenta una mayor variabilidad ambiental, expresada en una mayor exposición al viento y en una mayor frecuencia de eventos de bajas temperaturas, lo que afecta particularmente los tejidos más jóvenes. Estas condiciones explican en parte un crecimiento más heterogéneo dentro del rodal.

Por su parte, el predio Burgos se desarrolla bajo condiciones más exigentes desde el punto de vista ambiental, combinando mayores limitaciones edáficas con una mayor exposición climática. La mayor incidencia de heladas, la menor humedad atmosférica efectiva y la mayor exposición a vientos dominantes incrementan la demanda evaporativa y el riesgo de daño en tejidos, lo que repercute negativamente en el vigor de los árboles y en la acumulación de biomasa.

Los rodales seleccionados se encuentran establecidos sobre suelos de prioridad

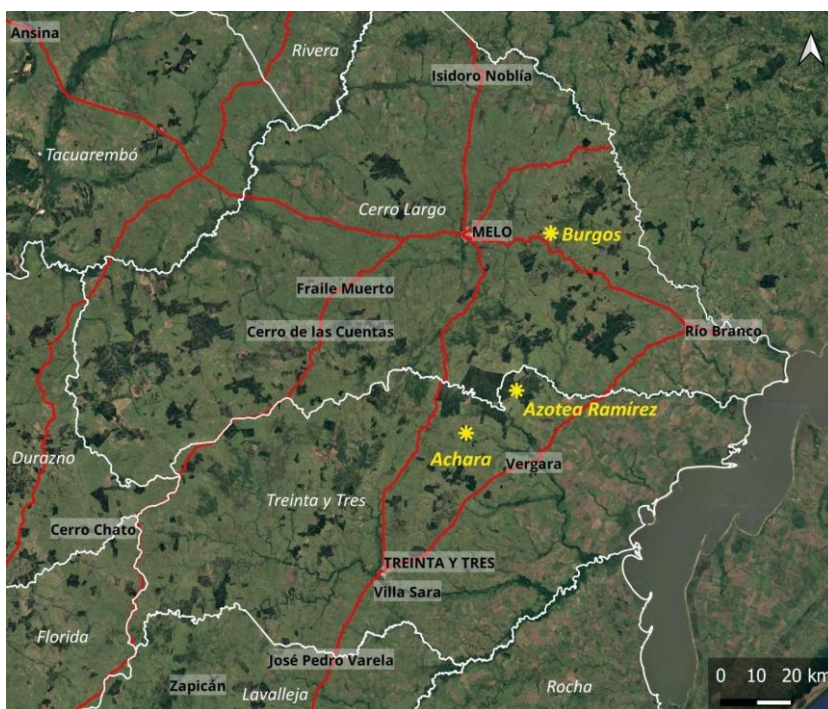
forestal, clasificados como 2.14 con un índice Coneat de 61, condiciones que favorecen el crecimiento y la calidad del material (Durán, 1976).

Se analizaron árboles de tres clases etarias (9, 12 y 15 años) correspondientes a diferentes materiales genéticos: INIA (para árboles de 9 años), INIA1G (para árboles de 12 y 15 años) y origen semilla.

De cada árbol (25 árboles seleccionados por sitio) se extrajeron seis probetas (árboles identificados del 1 al 75), considerando dos posiciones radiales (1 y 3) y tres zonas desde la médula hacia la corteza (A, B y C), con el objetivo de analizar la variación interna de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Figura 3

Mapa de referencia de los predios de los árboles en estudio



Nota. Adaptado de Google (2025a, 2025b, 2025c).

A su vez, entre los predios se registraron variaciones en el manejo silvícola, en las edades y alturas de las podas realizadas, así como en la aplicación de raleos. Estas diferencias permiten analizar la influencia de los factores de sitio y manejo (entre otros efectos) en las propiedades de la madera obtenida. Todos los árboles utilizados son *E. grandis* de origen semilla. Todas las plantaciones fueron establecidas con una densidad inicial de plantación de 860 árboles por hectárea.

Las podas se efectuaron a alturas similares: la primera a los 3 m, la segunda a 7 m, la

tercera poda a 9 m y la cuarta a los 11 metros de altura. La Tabla 1 presenta los datos de los grupos de árboles en evaluación, aportando al contexto de investigación previo a la recepción de las probetas cortadas y preparadas para el análisis.

Tabla 1

Datos de edad y predio de los árboles en estudio

Probetas	Edad al corte	Predio	Departamento
26 a 50	9	Achara	Treinta y Tres
51 a 75	12	Burgos	Cerro Largo
1 a 25	15	Azotea De Ramirez	Treinta y Tres

Para caracterizar los predios se utilizaron datos obtenidos a campo, incluyendo diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y volumen de los árboles. La Tabla 2 muestra las edades y alturas de poda correspondientes a cada rodal, mientras que la Tabla 3 resume la información de los raleos efectuados.

Tabla 2

Datos silviculturales de poda vinculados a los rodales en estudio

Edad	Edad 1a Poda	Altura	Edad 2a Poda	Altura	Edad 3a Poda	Altura	Edad 4a Poda	Altura
9	2,2	3	4,3	7	4,3	9	5,9	11
12	2,4	3	3,2	7	5	9	6,5	11
15	2,1	3	4,2	7	5,1	9	Sin dato	Sin dato

Tabla 3*Datos silviculturales de raleo vinculados a los rodales en estudio*

Edad	Árb / ha	Edad 1er raleo	Arb/ha
9	481	Sin raleo	481
12	457	8,5	285
15	446	8,2	288

3.2. Metodología

La metodología de trabajo se organizó en cuatro etapas principales: cubicación de las muestras, ensayos no destructivos, ensayos destructivos y determinación del contenido de humedad y densidad de las muestras. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo y estadístico de los resultados para contrastar la hipótesis planteada.

Las probetas fueron estibadas y sometidas a secado al aire bajo techo, es decir, protegidas de la intemperie. Las mismas fueron enviadas en estado verde y almacenadas durante un período aproximado de dos meses, con el objetivo de permitir la pérdida gradual de humedad hasta alcanzar un contenido cercano al equilibrio higroscópico con el ambiente. Durante el proceso de secado se produjeron cambios dimensionales, los cuales pueden manifestarse tanto en forma de contracción o hinchamiento (principalmente asociados a variaciones en el contenido de humedad) como mediante deformaciones tales como compresión, torsión, curvaturas o abarquillado. Estas deformaciones se originan como respuesta a sollicitaciones mecánicas y a gradientes de humedad y temperatura. Bajo estas condiciones, la exposición a variaciones cíclicas de temperatura y humedad acentúa dichos fenómenos, generando deformaciones diferenciales en función de la orientación de las fibras y de la naturaleza anisotrópica de la madera, lo que puede afectar su estabilidad dimensional y su desempeño en servicio. Se estimó que, al momento del ensayo, las probetas presentaban un contenido de humedad cercano al 12 %.

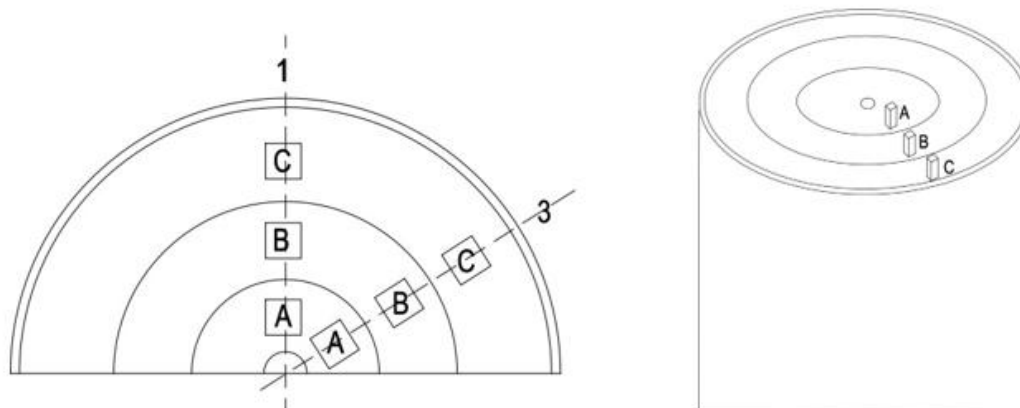
3.2.1. Cubicación de las probetas

Las probetas fueron recibidas y secadas antes de su almacenamiento. Se trabajó con probetas rectangulares de aproximadamente 400 mm de largo, 25 mm de ancho y 25 mm de espesor, previamente numeradas por árbol y por zona de extracción.

Cada probeta fue identificada según el esquema “número de árbol – zona dentro del fuste – posición radial”. La designación corresponde a tres zonas radiales desde la médula hacia la corteza (A, B y C) y dos posiciones radiales (1 y 3), seleccionadas según las posiciones utilizadas por otros instrumentos del proyecto (por ejemplo, tomografía). En total se analizaron 75 árboles, 25 por rodal (9, 12 y 15 años). La Figura 4 representa el diseño de la selección y disposición de las probetas en el fuste, considerando las posiciones radiales y las zonas desde la médula hacia la corteza.

Figura 4

Probetas 1 y 3 en posiciones A, B y C de médula a corteza



La cubicación de las probetas consistió en realizar tres mediciones de espesor y tres de ancho para obtener valores promedio, complementadas con la medición de largo total. Los instrumentos empleados fueron un calibre digital calibrado y una regla metálica de precisión calibrada. Una vez comenzada la primera etapa; las probetas se almacenaron en bolsas para conservar su estado higroscópico.

3.2.2. Ensayos no destructivos

Una vez registradas las dimensiones, se aplicaron ensayos no destructivos para estimar el módulo de elasticidad dinámico (MOE), mediante los equipos Fakopp (sónico) y Sylvatest (ultrasónico).

El Fakopp es un equipo de origen húngaro fabricado por la empresa ALNU Bt. Su función es medir el tiempo de propagación de una onda inducida por un impacto, recorriendo la distancia entre dos transductores ubicados en los extremos de la probeta. El principio

de funcionamiento consiste en generar una onda de tensión longitudinal mediante un golpe con martillo sobre el transductor de inicio, la cual se propaga a través de la madera y es registrada por el sensor receptor.

El procedimiento llevado a cabo mediante la utilización del Fakopp se resume en los siguientes pasos:

- a) Colocar la probeta sobre una base de madera.
- b) Clavar los sensores en los extremos de las tablas con la ayuda de una maceta de goma y conectarlos al equipo. Es importante que los sensores se encuentren bien alineados.
- c) Efectuar un golpe con un martillo en el transductor de inicio "start". El tiempo de propagación (en microsegundos) se lee inmediatamente en la pantalla. Repetir 3 veces este paso para promediar dicho valor.
- d) Extraer cuidadosamente los sensores sin dañar las conexiones del instrumento.
- e) Cálculo de la velocidad y evaluación del resultado.

A continuación, se presentan las fórmulas de cálculo para estimar el Módulo de elasticidad (MOE):

$$\frac{1}{t} - SW = \frac{(Et - sw * \frac{g}{\rho}) 1}{2}$$

Donde, $Et - sw$ es el módulo de elasticidad estimado mediante propagación de onda de impacto (MPa); $t - sw$ es el tiempo de propagación de la onda por unidad de distancia recorrida ($s \cdot m^{-1}$); g es la constante de aceleración gravitacional ($9.81 \text{ m} \cdot s^{-2}$); y ρ es la densidad de la madera ($g \cdot cm^{-3}$), calculada como $[\rho = w / (l * b * h)]$ donde w es el peso de la madera (g), l es el largo de la probeta (cm), b es el ancho de la probeta (cm) y h es la altura de la probeta (cm).

El Sylvatest es un equipo que permite a través del ultrasonido, la clasificación de la madera según sus propiedades mecánicas. Es de origen suizo y fue desarrollado por IBOIS (Instituto Federal de Tecnología de Suiza). Este equipo tiene tres cables de prueba (Figura 5). Dos de las salidas consisten en transductores piezoeléctricos, donde uno genera la onda ("sender") y el otro recibe la onda transmitida ("receiver") (Bucur, 1995; Wang & Carter, 2015). La tercera salida (entre las dos anteriores) proporciona mediciones simultáneas de contenido de humedad y temperatura de la madera. Empleando el microprocesador se pueden realizar las mediciones, y los distintos parámetros (especie, tipo de sección y largo de la tabla) se pueden seleccionar con mucha facilidad (Bucur, 1995; Wang & Carter, 2015).

Figura 5

Ensayo no destructivo en probeta de Eucalyptus grandis utilizando Sylvatest



El proceso de ultrasonido se basa en el principio de la relación física entre la velocidad de propagación de una onda de ultrasonido en la madera y las propiedades mecánicas de la madera en sí misma. Por otra parte, como la velocidad de propagación depende del contenido de humedad y la temperatura de la madera, estos factores también son medidos por el equipo. El instrumento calcula y proporciona la categoría de resistencia de la tabla ensayada, proporciona un valor promedio del Módulo de Elasticidad y sugiere un valor de resistencia a la flexión. El Módulo de Elasticidad (MOE) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{t} - uw = (E - uw * \frac{g}{\rho})^{1/2}$$

Donde, $Et-uw$ es el MOE por propagación de onda de ultrasonido; $t-uw$ es el tiempo de propagación de la onda de ultrasonido por unidad de distancia recorrida; g es la constante de aceleración gravitacional; ρ es la densidad [$\rho = w / (l*b*h)$] donde, w es el peso de la madera, l es el largo de la madera, b es el ancho de la madera y h es la altura.

En ambos casos, se realizaron tres mediciones por probeta y se utilizó el valor promedio como dato representativo. Los ensayos se efectuaron sobre una base de madera para evitar interferencias en la propagación de ondas. Los resultados registrados fueron empleados posteriormente para el cálculo de los módulos elásticos; debido a que mediante este tipo de técnicas, únicamente es posible estimar el módulo de elasticidad dinámico o la rigidez.

3.2.3. Ensayos destructivos

Posteriormente, las probetas fueron ensayadas en flexión estática en tres puntos utilizando una máquina universal de ensayos (modelo Minebea AL-250 kNB) en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), calibrada para capacidades de 50, 100 y 250 kN. El procedimiento se realizó conforme a la norma ASTM D143-14, respetando la posición basal de la probeta (cara más cercana a la médula orientada hacia abajo) y la distancia entre apoyos establecida por la norma. Durante el ensayo, se neutralizaron los valores iniciales de carga y deformación antes de cada medición. Los datos obtenidos permitieron generar curvas carga-deformación (kN–mm), a partir de las cuales se calcularon los valores del módulo de elasticidad estático (MOE) y el módulo de rotura (MOR) (Figura 6).

Figura 6

Método destructivo de Flexión en 3 puntos con máquina universal



El MOE (MPa) se estimó a partir del ensayo de flexión en tres puntos a partir de la siguiente ecuación:

$$MOE = E = \frac{\Delta L^3}{4bh^3}$$

El MOR (MPa) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$MOR = \sigma_f = \frac{3F_{max}L}{2bh^2}$$

Donde: F_{max} (N) es la carga máxima registrada; Δ es la pendiente $\Delta \equiv \frac{\Delta F}{\Delta \delta}$ (carga/deflexión) tomada en el tramo lineal (entre 10–40% de la F_{max}), L (mm) es la luz entre apoyos, b (mm) el ancho y h (mm) el espesor (altura) de la sección.

Los datos registrados por la máquina universal se procesaron mediante un script en lenguaje Python, utilizando el procesador Anaconda. Las planillas extraídas de la base de datos del equipo se importaron al programa para su análisis. El algoritmo definió el rango comprendido entre el 10 % y el 40 % de la carga máxima alcanzada en cada ensayo de acuerdo con la bibliografía técnica, y seleccionó diez puntos equidistantes dentro del tramo lineal de la curva carga–deformación. A partir de esos puntos se calcularon las pendientes mediante la siguiente ecuación:

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

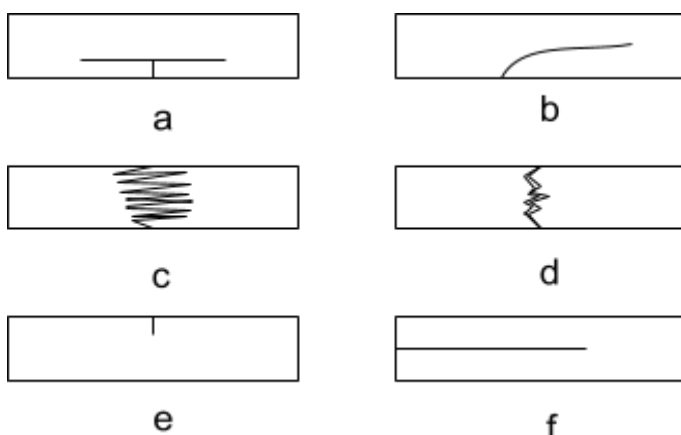
Dónde y corresponde a los valores de carga (2 final, 1 inicial) en kN, y x corresponde a los valores de deformación (2 final, 1 inicial) en mm.

El promedio de las pendientes obtenidas se utilizó como valor representativo para el cálculo de los módulos MOE y MOR, generando datos más robustos y representativos para cada probeta.

Con el fin de validar el procedimiento de cálculo, se realizó un análisis de correlación entre el módulo de elasticidad calculado mediante el script, denominado “MOE script”, y el obtenido manualmente a partir de la pendiente generada por la máquina universal, denominado “MOE manual”.

Durante el ensayo de flexión, cada probeta fue analizada visualmente con el objetivo de identificar defectos que pudieran influir en su comportamiento mecánico. Se registraron observaciones relacionadas con la presencia de nudos, desviaciones de la forma u otras irregularidades visibles, las cuales fueron consideradas posteriormente en el análisis de los resultados. Se definen por “tipo de rotura” según sugiere la norma, definido por posición y comportamiento de la madera. Es importante aclarar que este método es para aplicar en probetas libre de defectos, por lo que la norma no contempla ni sugiere casos donde las probetas rompen en los nudos (la zona más débil). Se utiliza una nomenclatura de “a” hasta “f”, definiendo cada tipo de rotura según cómo se comporta la madera. Como consecuencia de un uso diferente al que sugiere la norma D143 – 14 “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”, también se agrega la categoría de rotura “En nudo” (LATU, comunicación personal, 16 de enero, 2026).

La rotura tipo “a” es tensión simple, la “b” es tensión es tracción perpendicular a la fibra, la rotura “c” es tracción con astillamiento, la “d” es rotura frágil por tracción, la “e” es compresión y la “f” es cizallamiento horizontal. Las roturas pueden observarse en la siguiente figura (Figura 7).

Figura 7*Tipo de rotura según probeta*

Nota. Tomado de LATU (comunicación personal, 16 de enero, 2026).

3.2.4. Contenido de humedad y densidad

Una vez finalizados los ensayos mecánicos, se procedió a determinar el contenido de humedad de las probetas con el fin de interpretar correctamente los valores obtenidos. Para ello, cada probeta fue cortada en secciones de aproximadamente 3 cm², representativas de la muestra completa previamente ensayada en la máquina universal. El objetivo de este recorte fue obtener un material de menor tamaño que facilitara la manipulación y el procesamiento.

Cada muestra se pesó inicialmente en una balanza de precisión, registrando el peso húmedo (P_h) correspondiente al peso total de la madera más el agua contenida en ella. Posteriormente, las probetas se introdujeron en una estufa a 103 ± 2 °C durante 48 horas, tiempo previamente verificado como suficiente para alcanzar el peso anhidro. Este procedimiento garantiza la eliminación completa del agua libre e higroscópica.

Finalizado el secado, las probetas se pesaron nuevamente (dos veces consecutivas) y se consideró el peso seco (P_s) cuando la variación entre ambas mediciones fue inferior al 0,1 %, confirmando el equilibrio higroscópico. Los cálculos se realizaron en base seca, y el contenido de humedad se determinó mediante la siguiente expresión:

$$CH (\%) = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100.$$

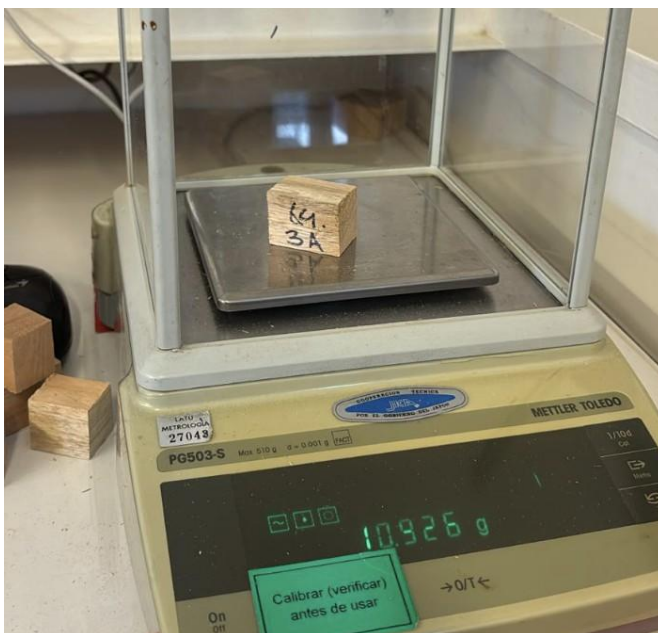
En las siguientes figuras se representan las pequeñas probetas en estufa, buscando llegar al peso anhidro para encontrar el contenido de humedad inicial de las mismas.

Figura 8

Probetas en estufa para la obtención de contenido de humedad por método gravimétrico

**Figura 9**

Probetas en balanza para obtención de contenido de humedad



Por otro lado, se determinó la densidad aparente de cada probeta, variable fundamental para la evaluación del material. La densidad (ρ) expresada en g/cm^3 , se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$\rho = m/V$$

donde ρ es la densidad (g/cm^3), m la masa (g) y V el volumen (cm^3).

3.2.5. Análisis de datos

Una vez obtenidos todos los datos por probeta, se obtiene la base de datos con todas las variables por árbol. Estas son: zona dentro del árbol (A, B o C), en dos puntos (1 y 3), espesor promedio, ancho promedio, largo, contenido de humedad, densidad, MOE tomado con Fakopp, MOE tomado con Sylvatest, MOE tomado con máquina universal pero procesado con el script mencionado previamente y MOE tomado de máquina universal pero de manera manual, y luego datos tomados a campo cómo son diámetro a la altura de pecho (DAP), altura (H) y Volumen. Una vez completa, se ingresa la base de datos al programa “Rstudio” en lenguaje “R” de programación para poder procesar los datos. Una vez realizado el ingreso se revisan los datos faltantes; y se comienza por un análisis descriptivo para conocer la distribución y el comportamiento que los mismos sugieren.

Se realiza un análisis primario dónde se observan datos que sobresalen de la media; los cuales se revisan uno por uno de manera de confirmar que son errores de procedimientos o que corresponden a metodología no aplicada de forma correcta.

Para ahondar en el análisis descriptivo, se realiza un análisis de medias generales tanto en módulo de elasticidad cómo de rotura para edades y zonas. La descripción y evaluación del comportamiento de los datos es fundamental para un posterior análisis de regresión. Se realiza un análisis de correlación de todas las variables presentes en el ensayo con el Módulo elástico de método testigo (con máquina universal) para conocer la correlación existente entre variables; para posteriormente realizar un análisis multivariado de los datos presentes.

De manera de lograr un análisis que permita resumir, visualizar e interpretar la estructura interna de un conjunto de muchas variables al mismo tiempo, se realiza un análisis multivariado de componentes principales y para la presentación del mismo, se utiliza un biplot. El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica multivariada que transforma un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo sistema de coordenadas formado por componentes principales ortogonales. Estos componentes son combinaciones lineales de las variables originales y capturan, en orden decreciente, la mayor proporción posible de la variabilidad total de los datos. Asimismo, el biplot es una representación gráfica que combina simultáneamente la proyección de los individuos (probetas) y la de las variables sobre el plano formado por los dos primeros componentes. Las direcciones y longitudes de las flechas indican la contribución y correlación de cada variable con los componentes, mientras que la posición de los individuos permite identificar agrupamientos, patrones estructurales y gradientes explicados por las variables.

Una vez analizadas las variables presentes, clasificadas cómo continuas en su mayoría, mientras que edad y zona se clasifican cómo categóricas binarias (la existencia de una elimina la existencia de las otras variables), se propone una regresión que pueda explicar con la participación de las variables de interés, el comportamiento del módulo elástico testigo. Previo a la propuesta, se evalúa si existe multicolinealidad entre las variables presentes. Posteriormente se plantea un modelo de regresión lineal que pueda inferir en el comportamiento elástico considerando las variables del estudio edad y zona dentro del árbol, buscando conocer de manera preliminar la significancia de las mismas en la evaluación de MOE.

Adicionalmente se verifican los supuestos del modelo; linealidad, normalidad de los residuos, homocedasticidad (varianza constante de los residuos), independencia de los residuos, normalidad de efectos aleatorios y ausencia de multicolinealidad, es decir, variables no redundantes.

Se propone un árbol de decisión para categorizar la variable continua (MOE) a partir de otras variables cuantitativas y categóricas, sin necesariamente suponer que la relación entre ellas es lineal. Se sugiere de manera preliminar, que el MOE varía en función de variables como la densidad, el diámetro, la altura, el contenido de humedad, etc.

Para validar el modelo propuesto en el árbol, se realiza una validación cruzada, utilizando "k fold", ya que este método permite evaluar el rendimiento predictivo de un modelo y comprobar qué tan bien generaliza a datos nuevos. Para esto, los datos se dividen en varios subconjuntos (folds), y el modelo se prueba repetidamente. Se divide el conjunto de datos en "k" partes (folds) aproximadamente del mismo tamaño y se repite este proceso "k" veces; en cada iteración, se usa (1-k) partes para entrenar el modelo y la parte restante se usa para validar (evaluar) el modelo. Luego, se calcula una métrica de rendimiento (por ejemplo, R^2 , RMSE) en cada validación y se promedian los resultados de las "k" iteraciones de manera de obtener una estimación más estable del desempeño del modelo. Es un método de validación de modelo sumamente útil ya que evita sobreajuste; debido a que el modelo no se evalúa sólo sobre los datos con los que fue entrenado y aprovecha mejor los datos debido a que cada observación se usa tanto para entrenar como para validar.

La propuesta del árbol de decisión incluye la evaluación del mismo tanto por criterio de poda cómo por qué tanto explica del modelo cada ramificación. Esta es una herramienta estadística muy útil, especialmente en busca de explorar qué variables explican mejor una respuesta (como el MOE no destructivo, densidad, etc.) sin asumir linealidad como en un modelo lineal mixto.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la fase experimental de la tesis y su correspondiente análisis y discusión.

4.1. Validación del método

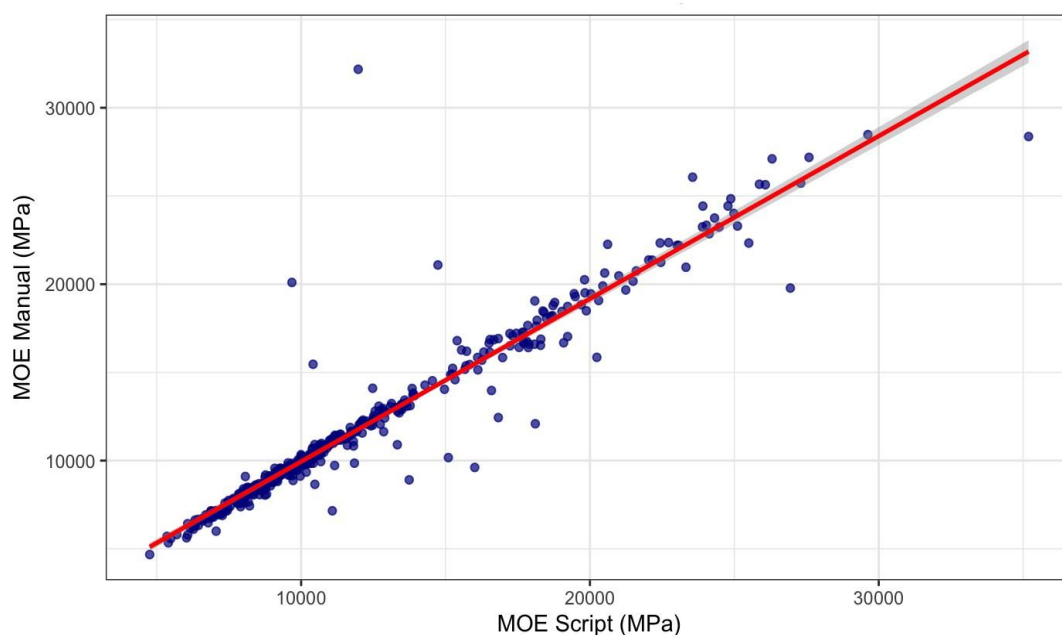
Los resultados obtenidos muestran una alta correlación entre el método manual y el método mediante script, lo que confirma la confiabilidad del procesamiento computacional de los datos. El coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0,954$) indica una relación lineal fuerte y positiva entre ambos métodos, lo que respalda la validez del procedimiento desarrollado.

En la Figura 10 se presenta la gráfica de dispersión de los valores de módulo de elasticidad (MOE) obtenidos manualmente en comparación a los valores calculados por el script. Se observa una tendencia claramente lineal, lo que evidencia la consistencia entre ambos procedimientos.

Estos resultados permiten concluir que el método computacional genera valores robustos y reproducibles, ya que considera diez pendientes equidistantes dentro del tramo lineal (10-40 % de la carga máxima) y, por lo tanto, captura de forma más completa la variabilidad experimental, eliminando el sesgo asociado al criterio subjetivo del operario.

Figura 10

Gráfica de dispersión de MOE manual con respecto al MOE script



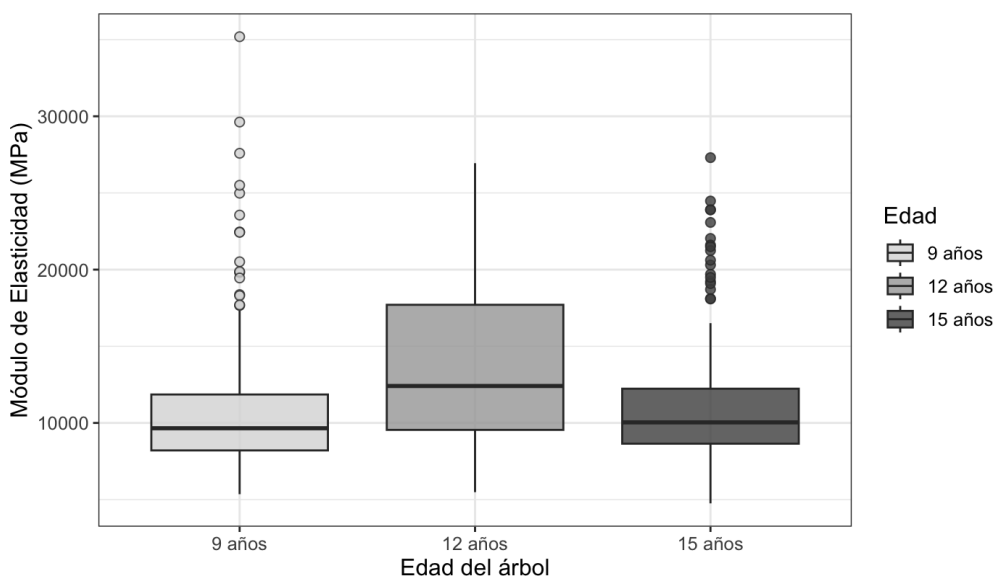
4.2. Análisis descriptivo

Se tomó como punto de partida el método de evaluación del módulo de elasticidad (MOE) obtenido mediante ensayos en máquina universal y procesado con el script en Python, debido a que se obtuvieron datos robustos y confiables.

Con el objetivo de analizar las diferencias en los valores de MOE entre edades y zonas del árbol, se realizó un análisis descriptivo de los resultados. Este abordaje permite identificar tendencias en el comportamiento del material y evaluar la influencia de las variables en las propiedades mecánicas de la madera.

Figura 11

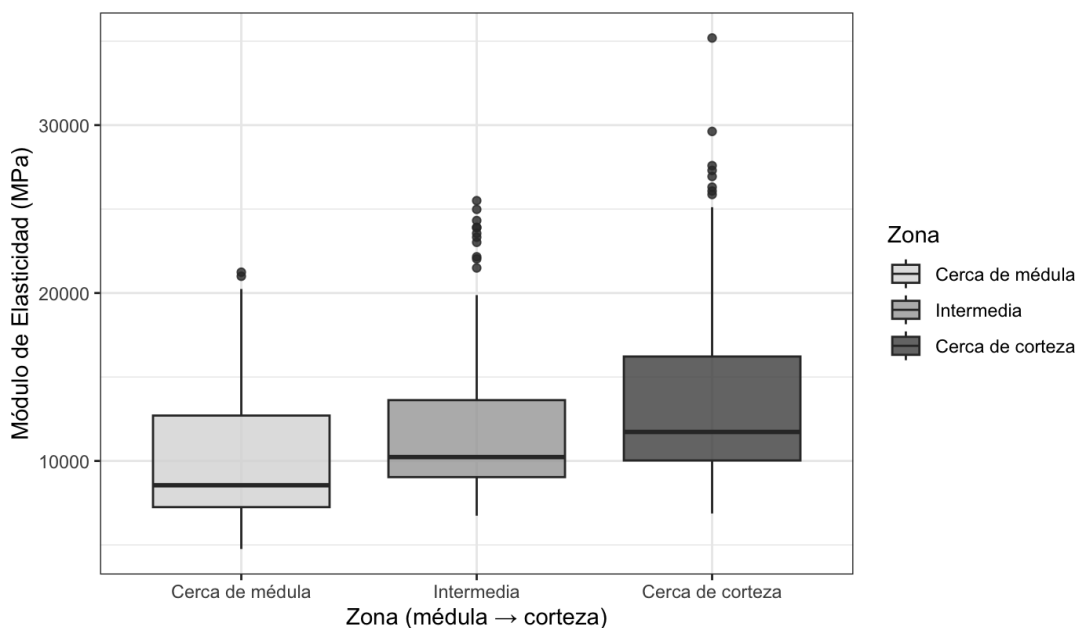
Boxplot de MOE (MPa) según edad de los árboles



La Figura 11 presenta la distribución del MOE en función de la edad de los árboles, observándose un incremento del MOE promedio entre los 9 y los 12 años. No obstante, los árboles de 15 años muestran valores de MOE similares a los registrados a los 9 años, lo que sugiere la posible influencia de otros factores que podrían explicar esta disminución no esperada en los valores de MOE.

Figura 12

Boxplot de MOE (MPa) según zona dentro de árboles (posición radial de médula a corteza)



En la Figura 12 se observa la variación radial del MOE desde el centro del árbol hacia el exterior, donde se evidencia un incremento progresivo desde la médula hacia la corteza. Este comportamiento refleja la transición entre la madera juvenil y la madera adulta, asociada a un aumento de la densidad y a una estructura más uniforme, factores que incrementan la rigidez longitudinal del material.

Resultados reportados por Pérez del Castillo y Venturio Cammarota (2003) y Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2" (2004) señalan que, además de la edad, factores como la calidad de sitio, las condiciones de crecimiento, la densidad de la madera y la presencia de madera juvenil tienen una influencia determinante sobre el módulo de elasticidad. En particular, los estudios del LATU reportan una elevada variabilidad intra e interrodal en valores de MOE para *Eucalyptus grandis* en Uruguay, aún en rodales de edades similares, atribuida principalmente a diferencias de sitio y a efectos silvícolas.

Estos antecedentes permiten interpretar que las diferencias observadas entre los árboles de 12 y 15 años podrían estar asociadas a variaciones en las condiciones ambientales de los predios, al historial de manejo de las plantaciones y/o al material genético utilizado, por encima del simple efecto de la edad cronológica. En consecuencia, los resultados obtenidos en este trabajo son consistentes con la evidencia generada por el LATU, que destaca la necesidad de considerar múltiples variables al analizar la rigidez estructural de la madera producida en plantaciones comerciales.

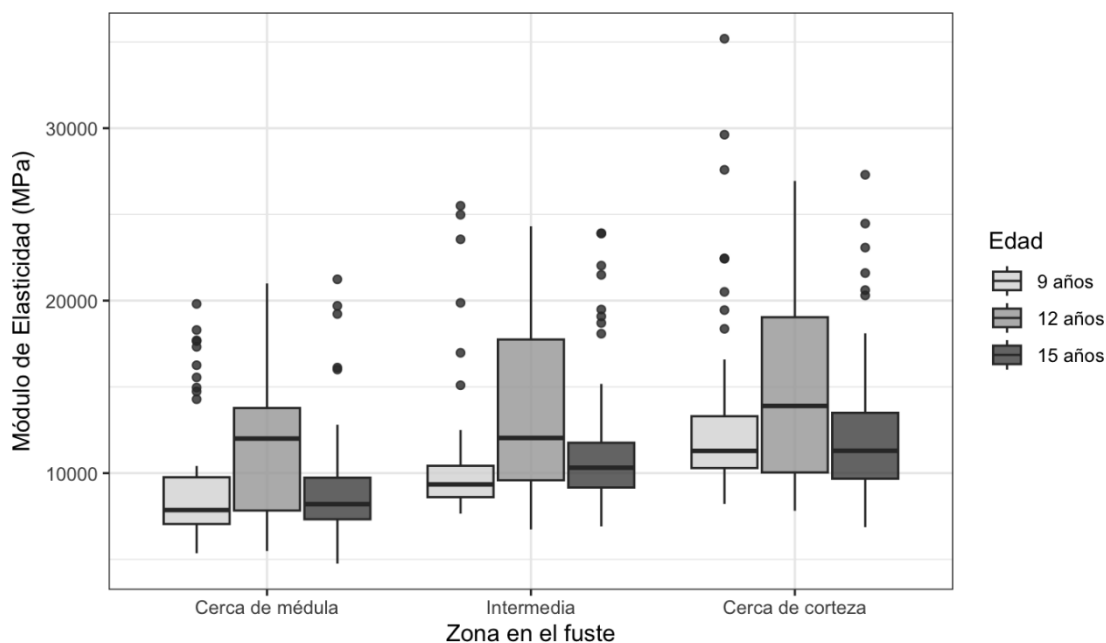
Al comparar los valores obtenidos en este estudio con los rangos reportados por el Pérez del Castillo y Venturio Cammarota (2003) y por el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto “GT2” (2004) para *Eucalyptus grandis* en Uruguay, se observa que los valores de MOE registrados se encuentran dentro de los intervalos típicos reportados para madera estructural de la especie, los cuales muestran una alta variabilidad según rodal, calidad de sitio y condición de la madera. En particular, los informes del LATU indican que es frecuente encontrar diferencias sustanciales en la rigidez incluso entre rodales de edades similares, atribuibles principalmente a variaciones en densidad, proporción de madera juvenil, sitio y manejo silvícola.

En este contexto, que los árboles de 12 años presenten valores de rigidez superiores a los de 15 años no resulta contradictorio con los antecedentes nacionales, dado que los estudios del LATU destacan que el módulo de elasticidad no depende exclusivamente de la edad cronológica, sino de la interacción entre crecimiento radial, condiciones ambientales y estructura interna de la madera. Por tanto, la diferencia observada puede interpretarse como consecuencia de efectos combinados de sitio, manejo y material genético, más que como un simple efecto etario.

Estos resultados refuerzan la importancia de analizar el comportamiento mecánico de la madera en función de múltiples factores y coinciden con la evidencia generada por el LATU, que enfatiza la necesidad de una evaluación integral de la calidad estructural para una correcta clasificación resistente y para el diseño en estructuras de madera.

Figura 13

Boxplot de MOE por zona según edad de los árboles y posición dentro del fuste



En la Figura 13 se representa la interacción entre la edad y la posición radial, donde se identifica que los árboles de mayor edad tienden a presentar una menor variabilidad interna y una distribución más homogénea del módulo de elasticidad, así como los árboles más jóvenes de 12 años. Este comportamiento refleja parcialmente la transición de madera juvenil a madera adulta, caracterizada por una estructura celular más estable; sin seguir este patrón para árboles de 12 años.

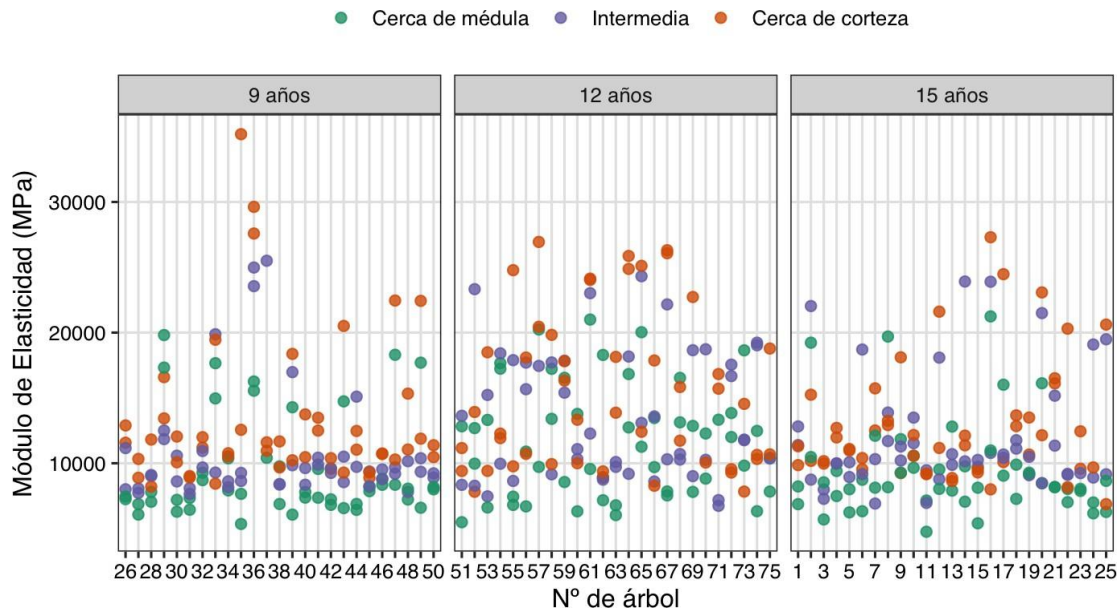
Este patrón es consistente con los resultados reportados por Pérez del Castillo (2001) y por el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2" (2004), quienes documentaron una marcada variación radial de las propiedades mecánicas en *Eucalyptus grandis*, con valores más bajos y mayor dispersión cerca de la médula y un incremento progresivo hacia la periferia del fuste. Ambos estudios señalan que, a medida que aumenta la edad del árbol, se incrementa la proporción de madera adulta, lo que conlleva una reducción de la variabilidad interna y una mayor homogeneidad en parámetros como el módulo de elasticidad.

En este sentido, los resultados obtenidos en el presente trabajo sugieren patrones que indican que la maduración radial de la madera constituye un factor clave en la estabilidad estructural del material, y que la posición dentro del fuste resulta tan relevante como la edad cronológica al momento de evaluar la rigidez mecánica de la madera destinada a usos estructurales.

En la Figura 14 se presenta la distribución de densidad del módulo de elasticidad (MOE) para las tres edades evaluadas. El gráfico busca definir patrones de heterogeneidad de datos; demostrando una notoria variabilidad dentro de un mismo grupo de árboles, asociada fuertemente al origen genético del árbol (semilla), presentando así diferencias entre individuos asociadas a la reproducción sexual y a diferencias genéticas entre los mismos.

Figura 14

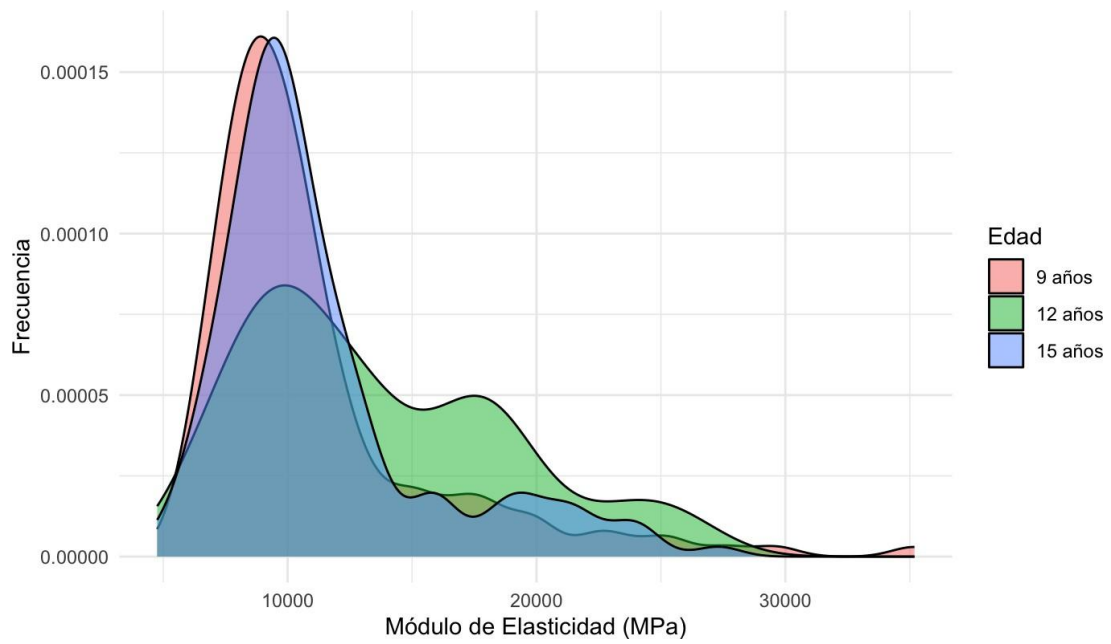
Diagrama de dispersión de MOE (MPa) para edad evaluado con máquina universal



En la Figura 15 se observan diversas modas por edad, lo cual se puede inferir que puede corresponder a las diferentes zonas dentro del árbol que fueron medidas. Por otro lado, la distribución de datos de 9 y 15 años presenta similitudes; lo cual brinda información de utilidad para el análisis posterior. Conocer el comportamiento de la distribución de las frecuencias de los datos es fundamental para utilizar otros métodos de evaluación de datos como por ejemplo la correlación de Pearson. Los datos presentan una distribución que puede simular una normal lo que indica que tienen forma de campana, una media que indica el centro de la distribución y un desvío que indica la dispersión de los datos alrededor de la media.

Figura 15

Curvas de densidad de datos, de distribución de MOE según edad, evaluado por máquina universal

**Figura 16**

Curvas de densidad de MOE a 9 años por zona evaluado por máquina universal

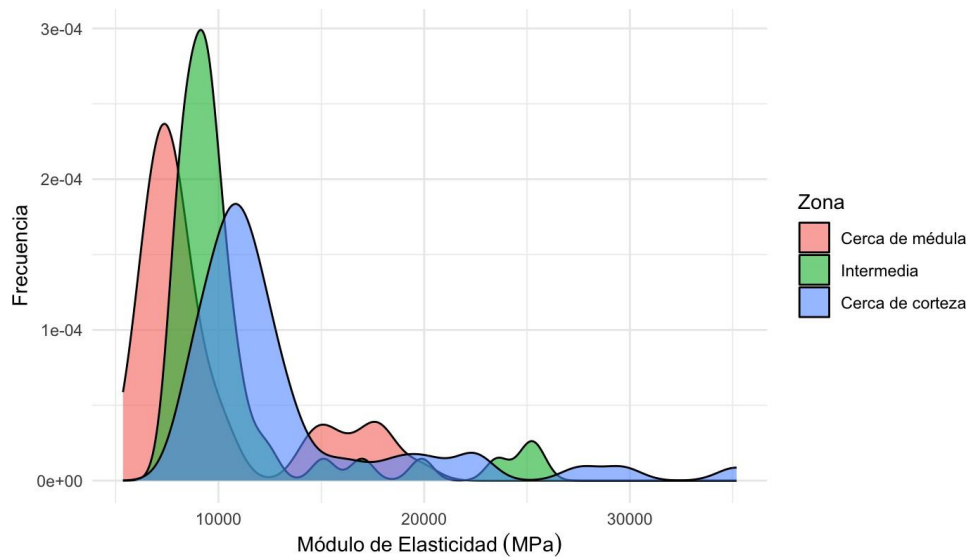
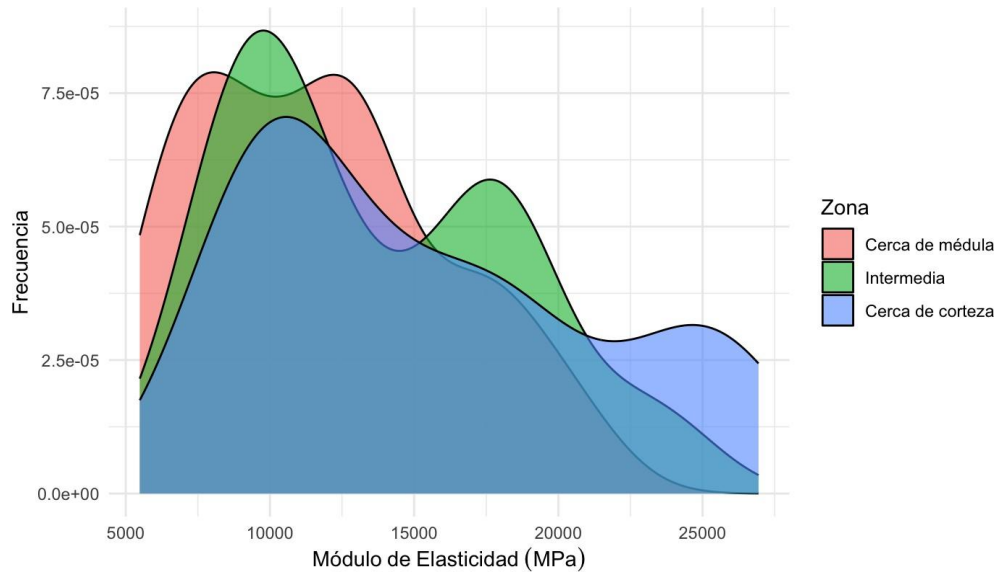
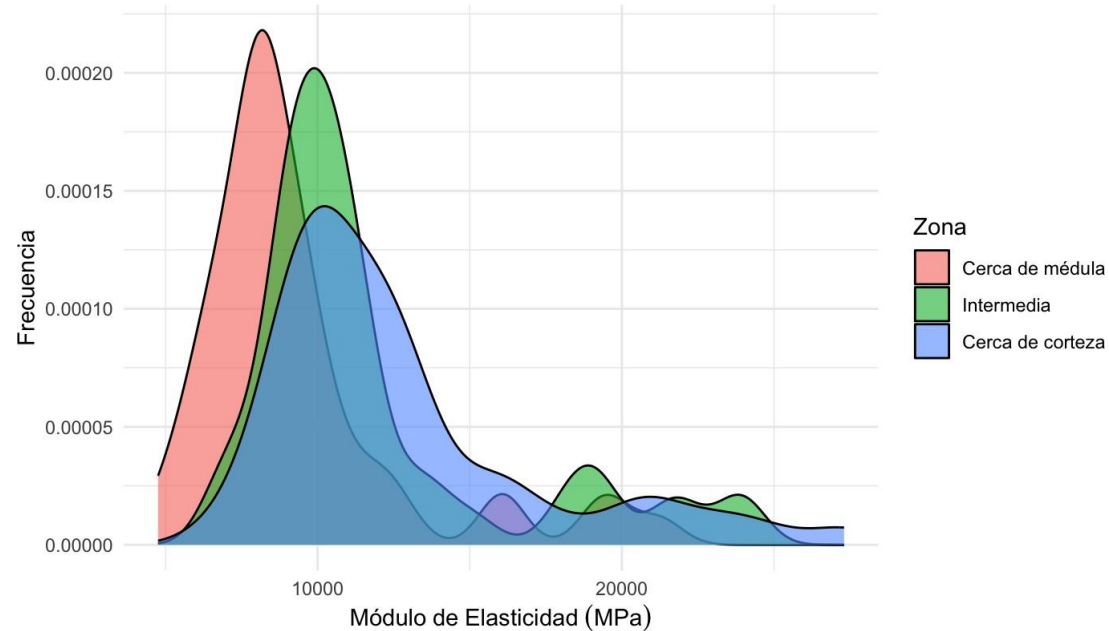


Figura 17

Curvas de densidad de MOE a 12 años por zona evaluado por máquina universal

**Figura 18**

Curvas de densidad de MOE a 15 años por zona evaluado por máquina universal



En las curvas de densidades se observa la distribución de frecuencia de los datos, donde la diferencia por zona se puede observar diferenciada por edad. Existen zonas de datos explicadas únicamente por una zona en una edad.

En la Tabla 4 se presentan los valores medios de MOE clasificados por edad y por zona radial, los cuales complementan la interpretación gráfica y permiten cuantificar las

diferencias observadas en la distribución de los datos.

En la Tabla 4 se presentan los valores medios del módulo de elasticidad (MOE) obtenidos mediante ensayos en máquina universal, clasificados por edad y por posición radial dentro del árbol. Las medias totales fueron de 11.166 MPa para los árboles de 9 años, 13.611 MPa para los de 12 años y 11.313 MPa para los de 15 años.

Tabla 4

Valores de medias para MOE por zona y edad obtenidos con máquina universal

MOE (MPa)	Promedio			
	general	Cerca de médula	Intermedia	Cerca de la corteza
9 años	11166,21	9478,62	10737,42	13240,27
12 años	13611,39	11791,93	13618,35	15461,79
15 años	11313,57	9362,27	11857,00	12721,44

Dentro de cada grupo etario, se observa un incremento progresivo del MOE desde la médula hacia la corteza: en los árboles de 9 años los valores aumentan de 9.479 MPa cerca de la médula a 13.240 MPa en la periferia; en los de 12 años, de 11.792 MPa a 15.462 MPa; y en los de 15 años, de 9.362 MPa a 12.721 MPa. Este comportamiento creciente concuerda con lo esperado en términos de maduración del tejido leñoso y transición hacia madera adulta.

Sin embargo, el valor para 12 años en comparación con el de 9 (media más baja) se difiere de la bibliografía (en Uruguay, el LATU reporta para *Eucalyptus grandis* valores de MOE típicamente comprendidos entre 10.000 y 16.000 MPa en madera estructural, con incrementos radiales desde médula a corteza y alta variabilidad entre rodales y sitios (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2", 2004) y no es lo estrictamente esperable. Esto determina el análisis de un factor fundamental; y es la variabilidad presente en el ensayo. Los valores no esperables pueden deberse a que las diferencias entre los árboles no están estrictamente ligadas a la edad, sino que existen diferencias en el factor sitio, en el factor genético ya que provienen de semillas y en la selección de los árboles, ya que, por ejemplo, no sabemos si los mismos no fueron

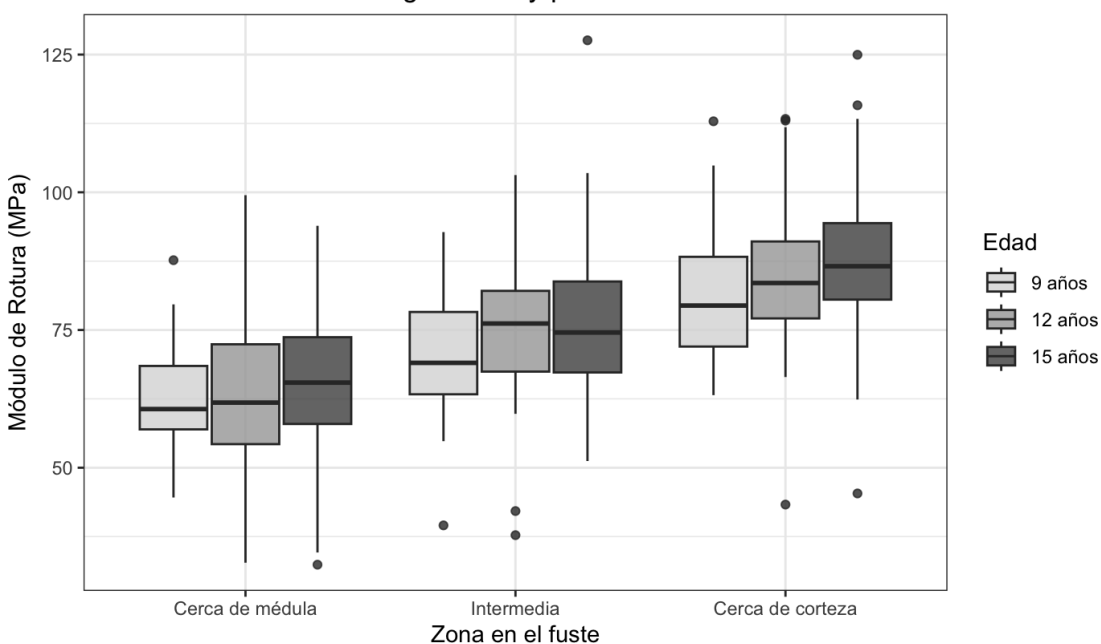
seleccionados del borde. Es aquí que surge la idea de que puede haber efectos confundidos.

En la Tabla 5 se presentan los valores medios del módulo de rotura (MOR) obtenidos mediante ensayos en máquina universal, clasificados por edad y posición radial dentro del árbol. Las medias totales fueron de 71,20 MPa para los árboles de 9 años, 74,35 MPa para los de 12 años y 76,30 MPa para los de 15 años.

Al analizar la variación radial, se observa un incremento progresivo del MOR desde la médula hacia la corteza para todas las edades evaluadas. En los árboles de 9 años, los valores aumentan de 62,60 MPa cerca de la médula a 80,71 MPa en la corteza; en los de 12 años, de 62,58 MPa a 85,58 MPa; y en los de 15 años, de 64,21 MPa a 87,98 MPa. Este comportamiento es coherente con la maduración del tejido leñoso y con la mayor densidad observada hacia la periferia del fuste.

Figura 19

MOR para el total de probetas del experimento; según edad y posición dentro del fuste



Las medias de módulo de rotura presentes en el estudio evaluadas con máquina universal corresponden en total por edad a 71,197 (MPa) para 9 años, 74,353 (MPa) para 12 años y 76,296 (MPa) para 15 años.

Tabla 5

Valores de módulo de rotura obtenidos con máquina universal

MOR (MPa)	Promedio			
	general	Cerca de médula	Intermedia	Cerca de corteza
9 años	71,197	62,604	70,261	80,707
12 años	74,353	62,576	74,917	85,577
15 años	76,296	64,207	76,706	87,975

4.3. Correlación entre métodos: destructivos y no destructivos

En el presente estudio, el módulo de elasticidad se realiza mediante técnicas no destructivas y se compara con el valor obtenido a partir de ensayos de flexión estática, considerado como método de referencia. La comparación entre ambas técnicas permitió analizar la capacidad de los métodos no destructivos para reproducir el comportamiento mecánico de la madera de *Eucalyptus grandis* y evaluar su potencial aplicación en procesos de clasificación estructural.

Los valores de módulo de elasticidad dinámico obtenidos a partir de la velocidad de propagación de ondas longitudinales presentaron, en general, una tendencia coherente con los valores de MOE determinados en máquina universal. Este comportamiento coincide con antecedentes nacionales y regionales, donde se ha observado una correlación positiva entre ambos parámetros, con coeficientes de correlación moderados a altos (0,60 a 0,80), especialmente cuando el contenido de humedad se encuentra controlado y las probetas presentan baja incidencia de defectos (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto “GT2”, 2004; Pérez del Castillo, 2001).

Tal como se reporta en estudios realizados en Uruguay sobre *Eucalyptus grandis*, los valores dinámicos tienden a ser sistemáticamente superiores a los valores estáticos, debido a la naturaleza instantánea del ensayo no destructivo y a la ausencia de fenómenos asociados a la aplicación lenta de carga en los ensayos de flexión. Esta diferencia no invalida el uso de las técnicas no destructivas, sino que refuerza la necesidad de emplear modelos de regresión específicos, que permitan ajustar los

valores dinámicos y estimar con mayor precisión el módulo de elasticidad estático.

Asimismo, la dispersión observada entre ambos métodos puede atribuirse a la influencia de factores como la variabilidad radial dentro del fuste, la proporción de madera juvenil y adulta, el contenido de humedad, el sitio de crecimiento y la presencia de defectos naturales. En particular, la heterogeneidad asociada a diferentes edades y condiciones de sitio puede generar efectos confundidos que afectan tanto los valores medidos dinámicamente como los obtenidos mediante ensayos destructivos.

En este contexto, la aplicación conjunta de técnicas no destructivas y ensayos de referencia permite no solo estimar el módulo de elasticidad, sino también analizar la variabilidad del material y mejorar la interpretación de los resultados mecánicos. Estos enfoques resultan especialmente relevantes para la evaluación de madera estructural de *Eucalyptus grandis* en Uruguay, donde la necesidad de métodos rápidos, confiables y aplicables en condiciones de servicio constituye un aspecto clave para el desarrollo del sector forestal y maderero.

El coeficiente de correlación de Spearman, el cual fue calculado para todos los datos en estudio (todas las edades y posiciones radiales) mostró una fuerte asociación entre los métodos no destructivos ($\rho = 0.94$), indicando que ambos equipos detectan de forma consistente las variaciones en la rigidez del material. En cambio, las correlaciones entre los métodos dinámicos y el método destructivo fueron moderadas ($\rho \approx 0,5$), lo que sugiere que, si bien existe una tendencia similar entre los resultados, los valores absolutos del módulo de elasticidad (MOE) obtenidos por ultrasonido difieren de los determinados mediante el ensayo estático en máquina universal.

Tabla 6

Valores de correlación de Spearman para distintos métodos: Máquina universal, Fakopp y Sylvatest en MPa

	MOE Fakopp	MOE Sylvatest	MOE M.U.
MOE Fakopp	1,0000	0,9403	0,5120
MOE Sylvatest	0,9403	1,0000	0,5267
MOE Máq. Universal	0,5120	0,5267	1,0000

Visualmente podemos observar el comportamiento en las figuras 20 y 21, dónde se puede observar un diagrama de dispersión de los datos de MOE con máquina universal y los no destructivos.

Figura 20

Diagrama de dispersión de MOE destructivo y MOE Fakopp con banda de confianza

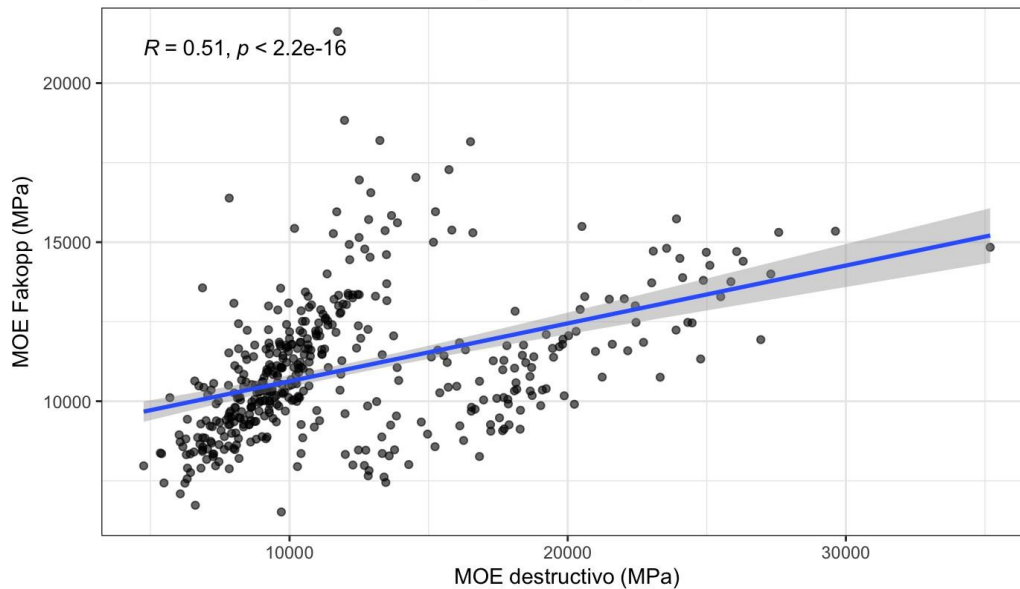
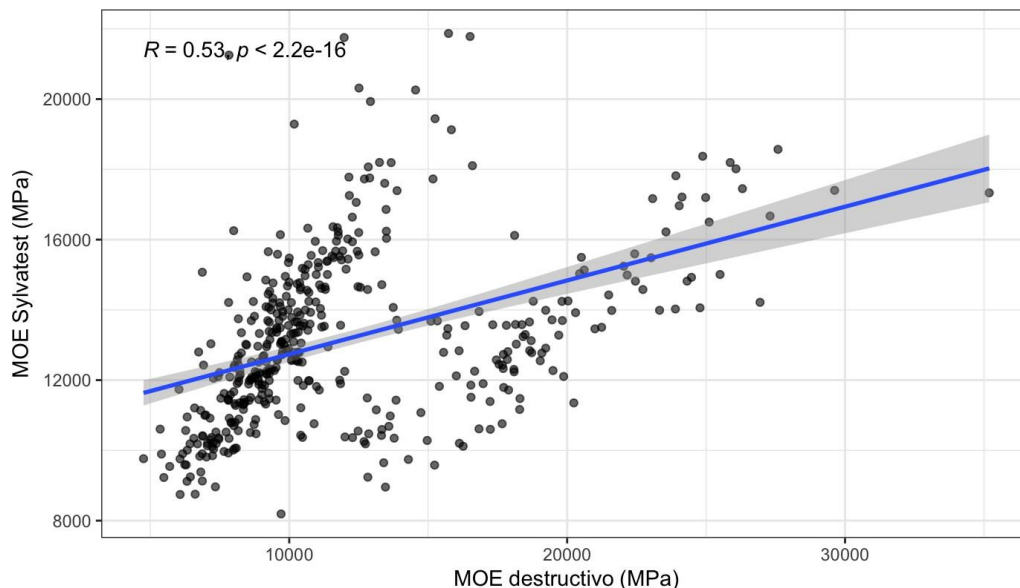


Figura 21

Diagrama de dispersión de MOE destructivo y MOE Sylvatest con banda de confianza



Los diagramas de dispersión entre el módulo de elasticidad determinado mediante ensayo destructivo y los valores obtenidos por métodos no destructivos (Fakopp y Sylvatest) evidencian relaciones positivas y estadísticamente significativas en ambos casos. Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos fueron moderados ($R =$

0,51 para Fakopp y $R = 0,53$ para Sylvatest; $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$), indicando que ambos métodos capturan parcialmente la variabilidad del comportamiento mecánico de la madera. Si bien el Sylvatest presenta una correlación levemente superior y una menor dispersión visual de los datos, ninguno de los métodos alcanza una capacidad predictiva suficiente a nivel individual. La elevada dispersión observada sugiere la influencia de otros factores no considerados directamente en la medición, tales como la densidad, la edad del árbol, la zona radial y el contenido de humedad. En este contexto, el Fakopp y el Sylvatest se presentan como herramientas útiles para la evaluación preliminar y la caracterización general del comportamiento mecánico de la madera en casos donde se requiere rapidez, no se puede destruir el material y se busca caracterizar tendencias generales del material, aunque no reemplazan en su totalidad a los ensayos destructivos cuando se requiere una estimación precisa del módulo de elasticidad.

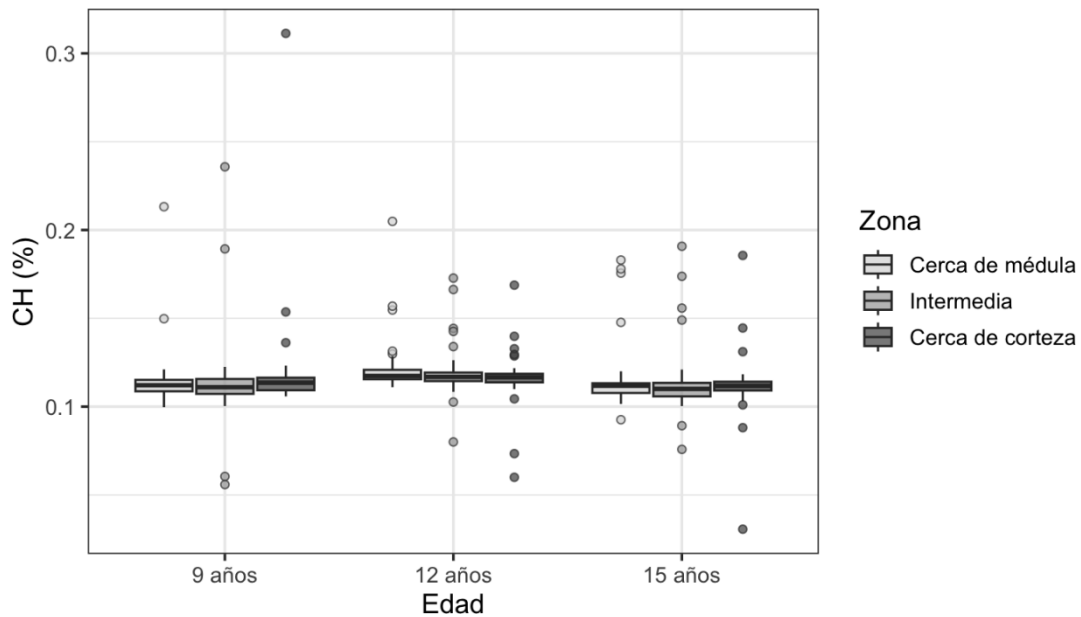
4.4. Análisis del comportamiento de las variables

Una vez determinados los valores medios del módulo de elasticidad (MOE) y del módulo de rotura (MOR) para las categorías de edad y zona radial, se procedió a analizar en profundidad otras variables relevantes que pueden influir en el comportamiento mecánico de la madera. Entre ellas se consideraron el contenido de humedad (CH) de las probetas, la densidad, el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol (H), el volumen individual (Vol) y las dimensiones de las probetas (espesor y ancho).

De forma descriptiva, las Figuras 22 a 25 presentan la variación de estas propiedades en función de la edad y la posición radial dentro del fuste. Se observa que el contenido de humedad tiende a mantenerse estable entre edades, mientras que la densidad presenta un incremento gradual hacia la corteza y con la edad, alcanzando los valores más altos en los árboles de 15 años. De forma paralela, el DAP, la altura y el volumen muestran un crecimiento consistente con la edad, lo que refleja la evolución esperable del desarrollo del fuste y la acumulación de biomasa.

Figura 22

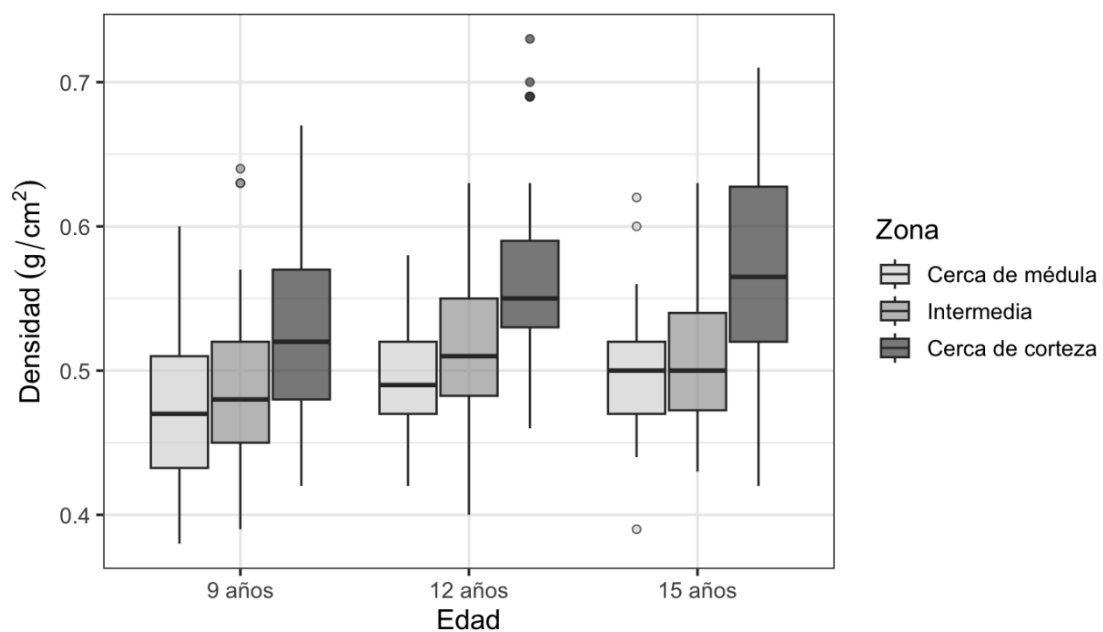
Variación de Contenido de humedad (CH) por edad y zona



La leve variación en el contenido de humedad por zona es esperable, ya que a medida que se avanza desde la médula a la corteza, cambia la estructura anatómica de la madera y junto con ella, la capacidad de retener agua. Es importante tener en cuenta que es en base a resultados de ensayos en laboratorio y que es esperable que se mantenga constante según zona y edad de árbol porque las probetas se estacionaron por varias semanas, en busca de un contenido de humedad para los ensayos en equilibrio con el ambiente.

Figura 23

Variación de densidad por edad y zona



Se observa una leve tendencia de incremento a medida que aumenta la edad y zona de los árboles. Esta característica es esperable considerando la transición a madera adulta; lo que implica cambios en el comportamiento y estructura anatómica de la misma. Esto resulta en árboles con madera más densa y por lo tanto mejor caracterizable desde el punto de vista mecánico y físico.

Figura 24

Variación de altura de árbol (H) en metros por edad

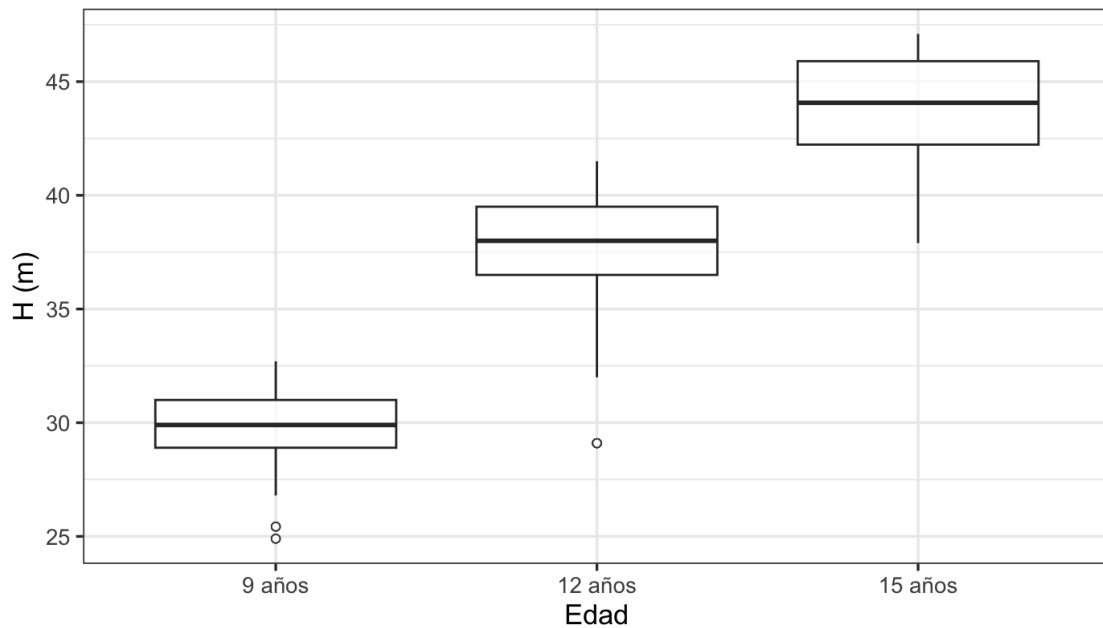
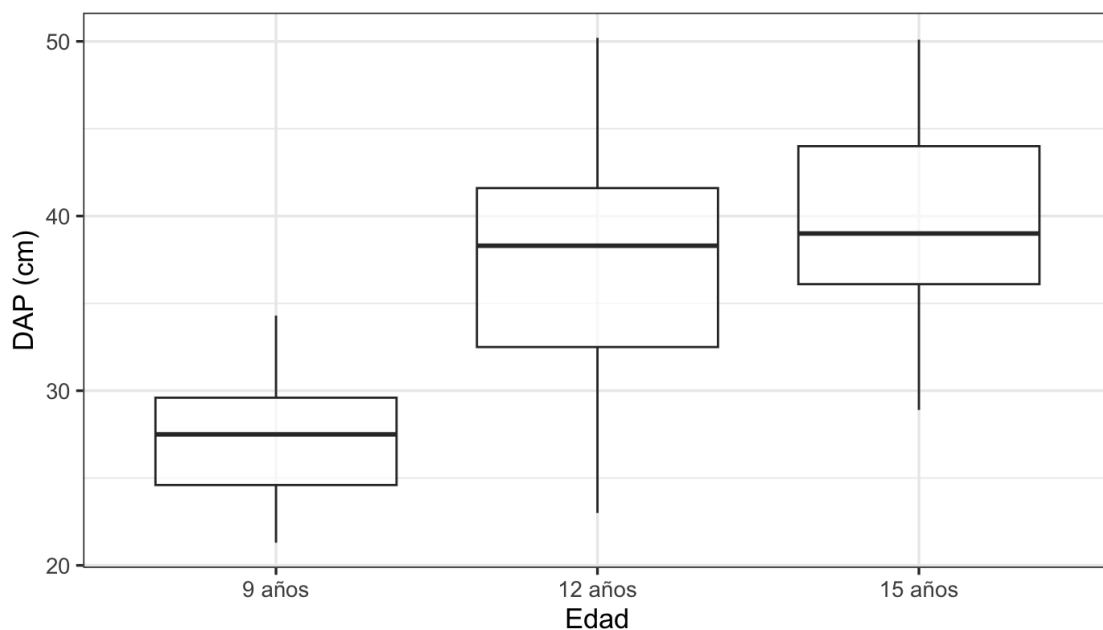


Figura 25

Variación de diámetro a altura de pecho de árbol (DAP) en centímetros por edad



Los promedios de DAP para los árboles en estudio fueron para 9 años 27,23 cm, para

12 años 37,22 cm y para 15 años 39,60 cm. Mientras que los promedios de altura para árboles de 9 años fueron de 29,71 metros, para 12 años 37,10 metros y para 15 años 43,87 metros. En comparación con bibliografía, se puede observar que hay diferencias en lo reportado para árboles de 9 años (valores promedio de DAP que oscilan entre 16 y 22 cm, con alturas totales comprendidas entre 18 y 24 metros), presentando los árboles del ensayo valores mayores a los promedios esperados. Para árboles de 12 años, se espera un DAP entre 22 y 30 cm y una altura de entre 24 y 32 metros. Lo observado fue considerablemente mayor a lo esperado según la bibliografía. Por último, los árboles de 15 años, presentaron valores mayores a lo sugerido en bibliografía. Mientras que se espera que los rangos de crecimiento se amplíen considerablemente a medida que aumenta la edad, DAP puede presentar valores desde 28 hasta más de 40 cm, con alturas totales que oscilan entre 28 y 38 m, dependiendo fuertemente de las condiciones ambientales y del historial de manejo del predio. Las diferencias son considerables, por ejemplo, los árboles en estudio presentaron 42,87 metros de altura promedio. Esto permite asociar las diferencias entre lo esperado y lo observado a condiciones genéticas o de sitio. Es importante considerar que los árboles en estudio provienen de semilla, generando variabilidad dentro del rodal logrando tener un efecto en los promedios generales; y que el efecto del sitio adquiere un peso relativo creciente frente a la edad cronológica. Esto refiere a que fuentes de variabilidad no controlables puedan explicar las diferencias observadas.

Otros factores que pueden estar asociados a las diferencias, mencionado en bibliografía son factores como la disponibilidad hídrica, la fertilidad y profundidad efectiva del suelo, el drenaje, la exposición a vientos dominantes y la ocurrencia de heladas tardías que influyen de manera acumulativa sobre el crecimiento diamétrico y en altura, generando respuestas contrastantes entre predios aún bajo una misma especie y edad. En este contexto, los resultados obtenidos confirman que la edad por sí sola no explica completamente las diferencias de crecimiento registradas, sino que estas deben interpretarse en conjunto con las condiciones de sitio específicas de cada predio. Por lo tanto, el análisis integrado de edad y calidad de sitio resulta indispensable para comprender la variabilidad observada y para orientar decisiones de manejo silvícola, como el turno de corta, los raleos y la selección de material genético.

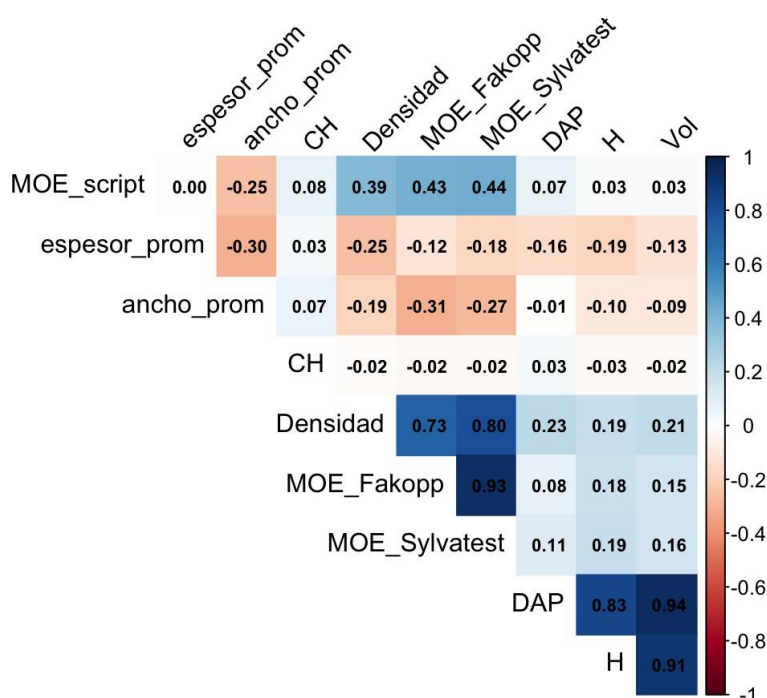
En los gráficos descriptivos de las características dasométricas -altura total (H), volumen y diámetro a la altura del pecho (DAP), evaluadas por edad y por zona radial, se observa una tendencia definida de incremento en la altura y el volumen a medida que los árboles avanzan en edad, lo cual coincide con el patrón de crecimiento esperado para *Eucalyptus grandis*. Sin embargo, el DAP no refleja esta progresión de manera tan

marcada: los rodales de 12 y 15 años presentan valores medios muy próximos entre sí, lo que sugiere una menor capacidad discriminante del DAP para diferenciar edades en esta etapa del turno.

La Figura 26 presenta la matriz de correlación entre el módulo elástico obtenido mediante máquina universal y las principales variables medidas. Los valores próximos a 1 indican una correlación positiva fuerte, mientras que los cercanos a 0 reflejan relaciones débiles o nulas.

Figura 26

Matriz de correlación de módulo elástico con todas las variables de interés



Se observa que las variables con correlación más fuerte son los módulos elásticos obtenidos con Fakopp y Sylvatest, seguidas por la densidad, el contenido de humedad (CH), el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura (H) y el volumen (Vol).

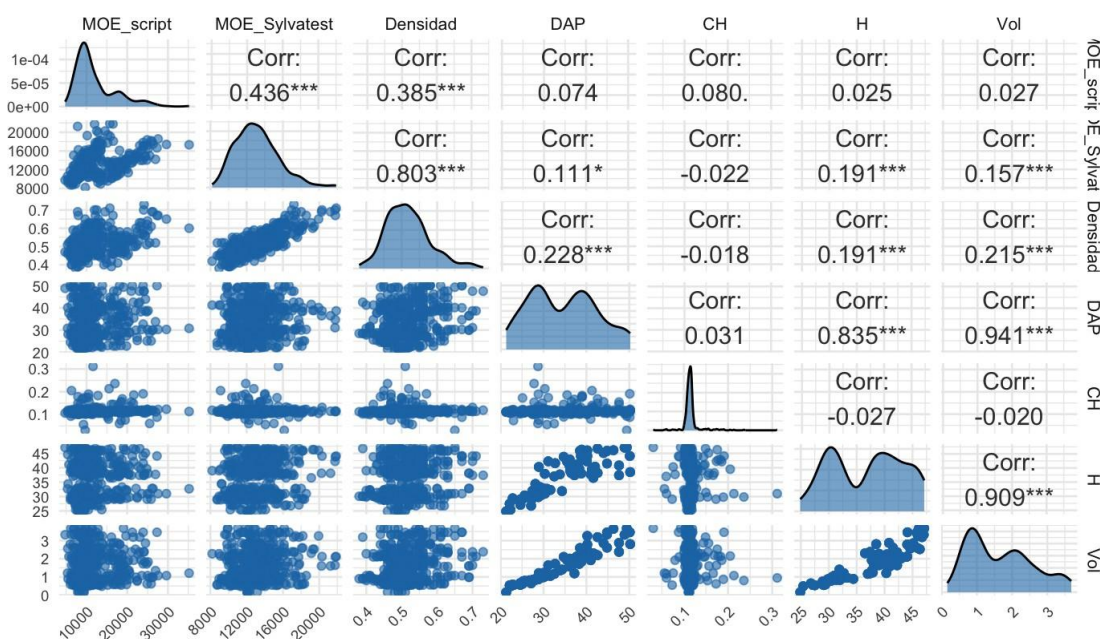
Sin embargo, no se observan buenos valores de correlación propiamente dichos. Esto puede deberse a la falta de categorización por edad o zona.

Las variables ancho y espesor presentan una correlación baja o nula, lo cual era esperable, ya que las probetas fueron preparadas con dimensiones controladas; las pequeñas variaciones observadas se atribuyen a la precisión de corte o medición.

La Figura 27 muestra un correlograma que combina los coeficientes de correlación con los diagramas de dispersión entre el MOE y las variables más representativas (MOE Sylvatest, densidad, DAP, CH, altura y volumen).

Figura 27

Correlograma con diagramas de dispersión y valores de correlación con significancia entre variables



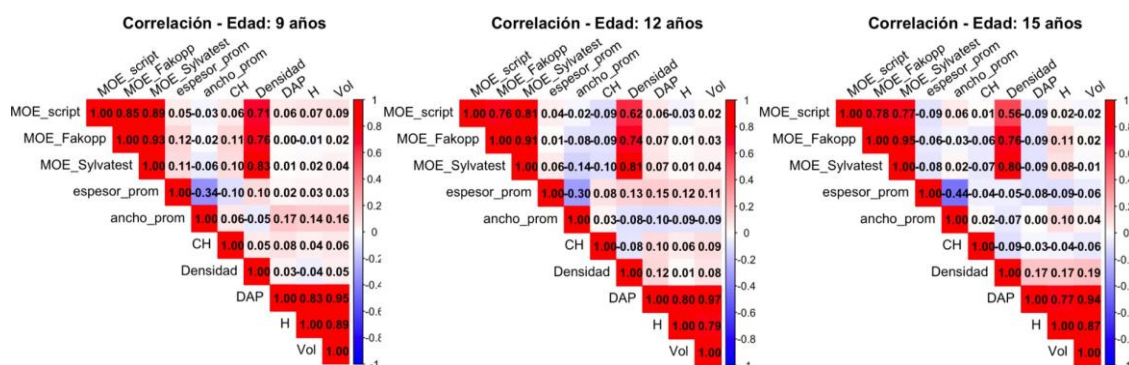
Las variables con mayor valor de correlación presentan un comportamiento marcadamente lineal en los diagramas de dispersión, especialmente el MOE obtenido mediante Sylvatest y la densidad, que muestran las asociaciones más fuertes con el módulo elástico determinado en máquina universal. Otras variables, como el contenido de humedad (CH), el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total (H) y el volumen (Vol), exhiben una relación positiva, aunque de menor magnitud.

En conjunto, estas observaciones permiten identificar los principales factores que inciden sobre el comportamiento mecánico del material y resultan relevantes para la construcción del modelo de regresión en la siguiente etapa. No obstante, también se detectaron variables altamente correlacionadas entre sí, lo que podría generar problemas de multicolinealidad, situación en la que dos o más predictores aportan información redundante, reduciendo la estabilidad y capacidad explicativa del modelo.

Finalmente, se realizó un análisis adicional por edad (9, 12 y 15 años) y por zona radial, cuyos resultados se muestran en la Figura 28. Este enfoque permitió evaluar con mayor detalle la estabilidad de las correlaciones en función del crecimiento del árbol y la posición dentro del fuste, proporcionando una comprensión más precisa del comportamiento de las variables involucradas.

Figura 28

Matriz de correlación para MOE por edad con todas las variables del ensayo

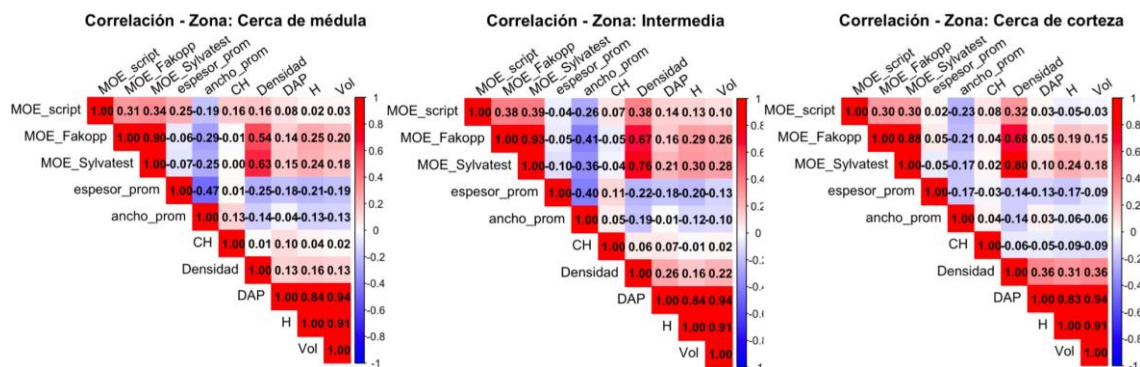


El análisis de correlación por edad muestra que el MOE script (el Módulo Elástico obtenido con máquina universal y procesado con script) se asocia fuertemente con los métodos no destructivos Fakopp y Sylvatest en todas las edades, con valores que oscilan entre 0.75 y 0.90. La relación es más alta en madera joven (9 años), disminuye ligeramente a los 12 años y vuelve a estabilizarse a los 15 años. La densidad presenta una correlación moderada únicamente a edad temprana, perdiendo influencia a medida que comienza una transición a madera adulta. Las variables estructurales del árbol (DAP, H, Volumen) no muestran relación con la rigidez, lo que sugiere que el tamaño del árbol y sus características dasométricas no predicen su calidad mecánica. La evolución del correlograma evidencia una transición desde un tejido juvenil homogéneo hacia un material más complejo y luego nuevamente estable, lo cual influye en la predictividad de los métodos no destructivos y en el rol de la densidad como predictor.

La relación entre la densidad y el módulo de elasticidad determinado mediante ensayo destructivo (MOE_script) evidenció una disminución progresiva con el aumento de la edad del rodal. Mientras que en los árboles de 9 años se observó una correlación moderada–alta entre ambas variables, en los rodales de 12 y 15 años dicha asociación fue moderada y moderada–baja, respectivamente. Este comportamiento indica que, a edades tempranas, la densidad explica una mayor proporción de la variabilidad del MOE, mientras que en edades más avanzadas la rigidez de la madera responde a un conjunto más amplio de factores estructurales y anatómicos, reduciendo el peso relativo de la densidad como variable explicativa única.

Figura 29

Matriz de correlación para MOE por zona con todas las variables del ensayo



Los métodos no destructivos muestran correlaciones bajas a moderadas con el MOE_script cuando se analizan por zona radial (0.30 - 0.40), muy por debajo de las correlaciones observadas cuando se agrupa por edad (0.75 - 0.90). Esto se explica porque el factor que más explica el comportamiento es la edad, y cuando agrupamos por zona agrupamos todas las edades (que tienen más efectos involucrados). Esto se diferencia de cuando agrupamos por edad que observamos correlaciones más fuertes porque los datos se agrupan y ordenan mejor.

La clasificación por edad revela patrones de correlación mucho más fuertes y consistentes que la clasificación por zona radial. Esto muestra que la variación estructural del MOE está mucho más asociada al desarrollo del árbol completo (edad) que a la posición relativa dentro del fuste (zona). Los análisis por zona no permiten explicar adecuadamente la rigidez, mientras que los análisis por edad sí capturan esta relación de manera significativa

4.5. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales busca expresar el efecto de los componentes principales y se utiliza para describir y analizar datos multidimensionales, es decir, observaciones con más de una variable por caso.

Tabla 7*Análisis de componentes principales PC (%)*

	PC1 (%)	PC2 (%)	PC3 (%)	PC4 (%)	PC5 (%)	PC6 (%)	PC7 (%)	PC8 (%)
Proporción de varianza	37,90	21,30	16,00	12,60	6,64	3,54	1,60	0,47
Proporción acumulativa	37,90	59,20	75,20	87,80	94,44	97,99	99,58	100,00

El primer componente (PC1) explica el 37,9% de la variación total del conjunto de datos, mientras que los dos primeros explican el 59%. Los primeros cuatro componentes acumulan el 87,7% de la variabilidad, por lo que capturan casi toda la estructura multivariada del conjunto de variables. En cuanto al análisis de los loadings, es importante aclarar que valores absolutos mayores (positivos o negativos) quiere decir que la variable contribuye fuertemente a ese componente; el signo solo indica dirección y que los componentes representan gradientes de variación conjunta.

El análisis de los loadings del análisis de componentes principales (tabla 7) permitió identificar dos gradientes claramente diferenciados. El primer componente principal (PC1) se encuentra dominado por variables dasométricas, tales como el volumen, la altura total y el diámetro a la altura del pecho, representando un eje asociado al tamaño y desarrollo del árbol. Se puede observar en la tabla como; Vol (-0,54), H (-0,52) y DAP (-0,52) son claramente dominantes en PC1. En contraste, el segundo componente principal (PC2) está fuertemente influenciado por la densidad y el módulo de elasticidad dinámico estimado mediante Fakopp, configurando un gradiente vinculado al comportamiento mecánico del material. La baja contribución de las variables dasométricas en PC2, así como de las variables mecánicas en PC1, indica una relativa independencia entre el tamaño del árbol y las propiedades mecánicas de la madera. Asimismo, el contenido de humedad presentó cargas reducidas en ambos componentes, sugiriendo un efecto limitado en la estructura multivariada de los datos bajo las condiciones evaluadas. Estos resultados refuerzan la importancia de considerar variables propias del material para la caracterización mecánica de la madera, más allá de las dimensiones del árbol.

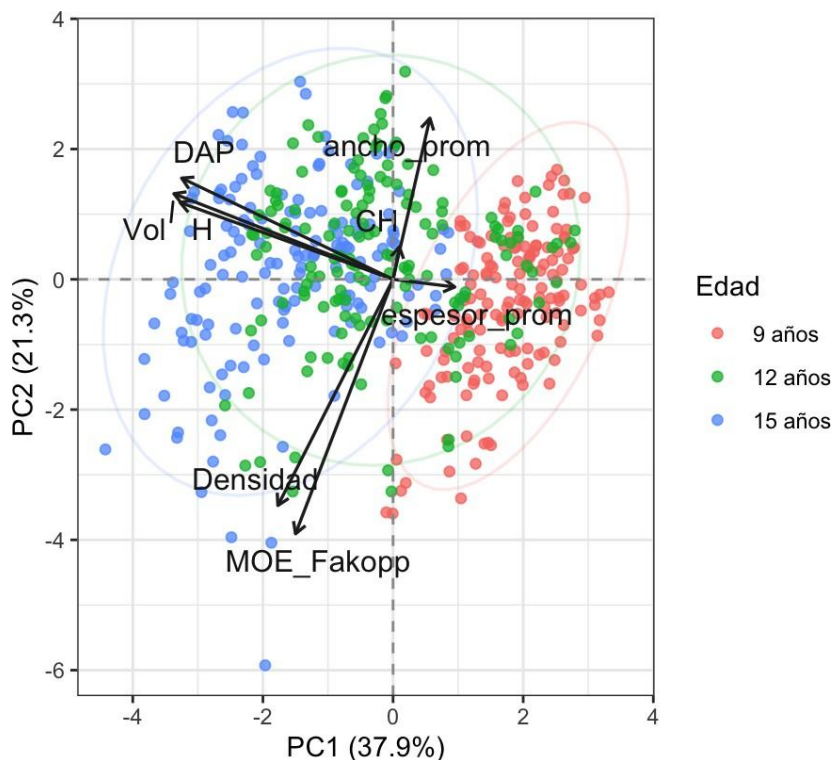
Tabla 8*Loadings para análisis de componentes principales*

	PC1	PC2
Vol	-0,5378	0,2098
H	-0,5227	0,1884
DAP	-0,5188	0,2481
Densidad	-0,2826	-0,5543
MOE Fakopp	-0,2393	-0,6237
Espesor promedio	0,1515	-0,0188
Ancho promedio	0,0905	0,3950
CH	0,0156	0,0799

En cuanto a la gráfica presente en la figura 30, explica el comportamiento de las variables para PC1 y PC2. En la siguiente figura se observa una representación de los dos primeros componentes (PC1 y PC2).

Figura 30

Biplot para el análisis multivariado de componentes principales (PCA)



Para el análisis del biplot se enfoca en cada eje que representa a cada componente principal. El eje horizontal representa el PC1, dominado por espesor y ancho con carga positiva, en oposición a DAP, Volumen y Contenido de Humedad. Este eje separa hacia la derecha probetas con mayores dimensiones de elementos estructurales, y a la izquierda individuos asociados a mayor tamaño de árbol; explicando la separación por edad observada. El eje vertical representa el PC2, asociado a MOE Fakopp y densidad, ambas con carga negativa. Este representa un gradiente mecánico.

Las variables se relacionan entre sí según los ángulos de las flechas representativas. MOE Fakopp y Densidad están asociadas de manera positiva, fuertemente; ya que son flechas próximas y con dirección similar. Por otro lado, DAP, Vol y CH se encuentran asociadas entre sí y reflejan condiciones de crecimiento y tamaño del árbol.

El biplot correspondiente al análisis de componentes principales muestra que los dos primeros componentes explican el 59,2 % de la variabilidad total de los datos. El primer componente principal (PC1, 37,9 %) representa un gradiente asociado principalmente a variables estructurales y dimensionales, como el espesor y el ancho promedio, en oposición a variables dasométricas como el diámetro a la altura del pecho, el volumen y el contenido de humedad. El segundo componente (PC2, 21,3 %) se encuentra fuertemente asociado a la densidad y al módulo de elasticidad dinámico estimado

mediante Fakopp, representando un gradiente mecánico del material. La distribución de los individuos en el plano PC1-PC2 evidencia una diferenciación por edad, donde los árboles de 9 años se asocian a características anatómicas propias de madera juvenil, los de 12 años presentan un comportamiento intermedio, y los de 15 años se vinculan a mayores valores de densidad y rigidez. Estos resultados refuerzan la influencia de la edad sobre las propiedades mecánicas y estructurales de *Eucalyptus grandis*, y concuerdan con los análisis de correlación realizados previamente.

4.6. Análisis visual de los defectos y su correlación con atributos de edad y zona

Todas las probetas se evalúan en presencia de nudos, alabeos y tipo de rotura una vez utilizada la máquina universal. Para correlacionar el análisis visual con lo analizado en lo descriptivo, se procede a un análisis por tipo de rotura y presencia de nudos.

Tabla 9

Frecuencia de nudos

Observaciones	n	Porcentaje
Con nudo	111	24,70%
Sin nudo	339	75,30%

En el análisis de las frecuencias se puede observar que un 24,7% de las probetas presentan defectos. Este análisis resulta fundamental al momento de conocer los módulos elásticos, ya que defectos pueden explicar menores propiedades mecánicas en la madera.

Tabla 10

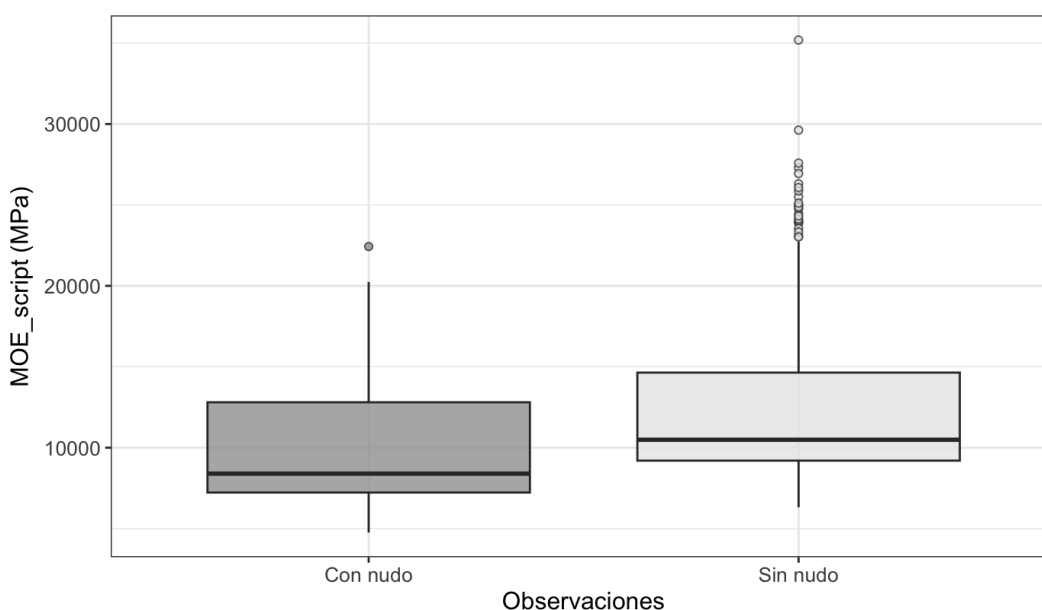
Tabla de observaciones y tipo de nudo

Observaciones	Nudo	a	b	c	d	e	f
Con nudo	33	18	24	3	4	29	0
Sin nudo	0	53	42	31	8	203	1

En la tabla 10 se puede visualizar cómo las probetas que presentan nudos, se fracturan de varias formas, dependiendo de la ubicación de los nudos. Las probetas que fracturaron en el nudo; tenían su defecto ocupando un gran porcentaje de la superficie; mientras que los que rompen con tipos de rotura de “a” a “f”, presentan defectos sobre los extremos, sin afectar en gran medida la rotura en la madera del nudo. Resulta interesante observar cómo las probetas con tipo de rotura “e” son las predominantes en las probetas sin nudos. La rotura tipo “e”, de compresión, presente en todas aquellas probetas que además presentan mayores valores de MOE y por ende mayor resistencia a la ruptura.

Figura 31

Boxplot con promedio de MOE según presencia de nudos



Las medias de MOE según el método de la máquina universal tienen una diferencia

según la presencia o no de nudos. En las probetas con nudos, el promedio de MOE se encuentra en 10.332,17 MPa; mientras que sin nudos se observa una media de 12.572,82 MPa.

Tabla 11

Análisis de varianza (ANOVA) del MOE script según el tipo de rotura

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Tipo de rotura	7	3.08×10^8	4.41×10^7	1.80	0.085
Residual	435	1.06×10^{10}	2.44×10^7		

Para conocer en profundidad si el tipo de rotura puede asociarse a las propiedades mecánicas (MOE), se realiza un modelo de clasificación y un ANOVA (evaluado para todas las probetas en estudio, tanto las con nudo, como las sin nudo y las roturas involucradas), a partir del cual se puede concluir que el análisis de varianza explica que el tipo de rotura no tiene un efecto significativo sobre el MOE_script ($F = 1,80$, $p = 0,085$). Aunque el valor p se aproxima al umbral de 0,05; no se encontró evidencia estadísticamente suficiente para afirmar que las probetas que rompen de forma diferente presentan rigideces medias distintas.

4.7. Modelo de clasificación por edad y zona

Posteriormente, se sugiere un modelo de clasificación de manera preliminar. El modelo es de clasificación porque todas las variables que se proponen son de clasificación (ninguna es cuantitativa) y esto resulta en un efecto en los grados de libertad que las toma como un factor. El modelo funciona asumiendo una distribución normal de los datos (visto en el histograma de distribución de datos de MOE). El modelo propuesto busca diferencias en Edad, Zona y la interacción de edad y zona; al mismo se lo denomina *Modelo de evaluación preliminar*.

$$MOE \text{ destructivo} = \text{Edad} + \text{Zona} + \text{Interacción Edad Zona}$$

Se aplica un ANOVA y se verifican los supuestos del modelo. Previo a la interpretación del modelo lineal, se evaluaron sus principales supuestos. La multicolinealidad entre los predictores fue analizada mediante el factor de inflación de la varianza generalizada

(GVIF), no detectándose niveles problemáticos. La normalidad de los residuos fue evaluada mediante el test de Shapiro–Wilk y mediante inspección gráfica, observándose desviaciones esperables asociadas al tamaño muestral. La homocedasticidad fue evaluada mediante el test de Breusch–Pagan, sin evidenciarse heterocedasticidad significativa. Finalmente, la independencia de los residuos fue analizada mediante el test de Durbin–Watson, detectándose autocorrelación positiva, atribuida a la estructura jerárquica de los datos (vinculación a árboles, lo cual explica la agrupación de los datos). En conjunto, los supuestos del modelo fueron razonablemente evaluados, si bien las limitaciones observadas contribuyeron a no priorizar el enfoque de regresión lineal en el análisis final.

Tabla 12

Resultados del ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Edad	2	546350175	273175088	125.678	4,95E-03	***
Zona	2	961746446	480873223	221.232	7,13E-07	***
Edad:Zona	4	37405794	9351448	0.4302	0.7868	
Residuales	432	9390032503	21736186			

Nota. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Primero se verifica el cumplimiento de supuestos. Posteriormente, se observan significancias para Edad y para Zona; sin embargo, no para la interacción de Edad y Zona. Esto es fundamental para el análisis de medias. En el mismo, realizado en las tablas 2 y 3, se observan diferencias significativas para las edades 9 y 12 y 12 y 15, y no para 9 y 15 quienes comparten grupo. Sin embargo, existen diferencias significativas entre zonas; ya que las medias no comparten grupo. Para esto se utilizó el paquete emmeans y se obtuvo las medias marginales estimadas, las cuales sirven para comparar grupos de manera más precisa, especialmente después de ajustar un modelo, ya que predicen la media de la variable dependiente para cada nivel de un factor,

manteniendo las covariables en sus valores medios (también llamadas medias de mínimos cuadrados).

Tabla 13

Análisis de medias para Edad

Edad	Media marginal	SE	gl	Grupo
9	11152	383	432	1
15	11339	383	432	1
12	13624	387	432	2

Tabla 14

Análisis de medias para Zona

Zona	Media marginal	SE	gl	Grupo
Cerca de médula	10211	383	432	1
Intermedia	12086	386	432	2
Cerca de corteza	13818	385	432	3

Para profundizar con el análisis, se evaluó la multicolinealidad entre las variables de interés, con el fin de evitar la superposición de efectos y asegurar una correcta interpretación de los resultados. La multicolinealidad puede generar dificultades para discriminar el efecto individual de cada variable cuando estas se encuentran altamente correlacionadas, situación frecuente en estudios de madera debido a la relación existente entre variables asociadas al crecimiento y la formación del leño.

La multicolinealidad entre los predictores del modelo fue evaluada mediante el factor de inflación de la varianza generalizada (GVIF). Dado que el modelo incluye factores categóricos y términos de interacción, se consideró el valor ajustado $GVIF^{1/(2 \cdot Df)}$ para su interpretación. En todos los casos, los valores obtenidos fueron inferiores a 2, lo que indica ausencia de multicolinealidad problemática entre las variables Edad, Zona y su interacción. Por lo tanto, la estructura del modelo no se vio afectada por colinealidad entre los predictores.

En este trabajo se analizó la relación entre variables como edad, posición radial, densidad y contenido de humedad, considerando tanto su vínculo estadístico como su coherencia biológica. Este análisis permitió identificar posibles redundancias y seleccionar combinaciones de variables que aportan información independiente, contribuyendo a la robustez de los modelos de regresión utilizados y reduciendo el riesgo de efectos confundidos en la explicación del comportamiento mecánico de la madera.

4.8. Árbol de decisión

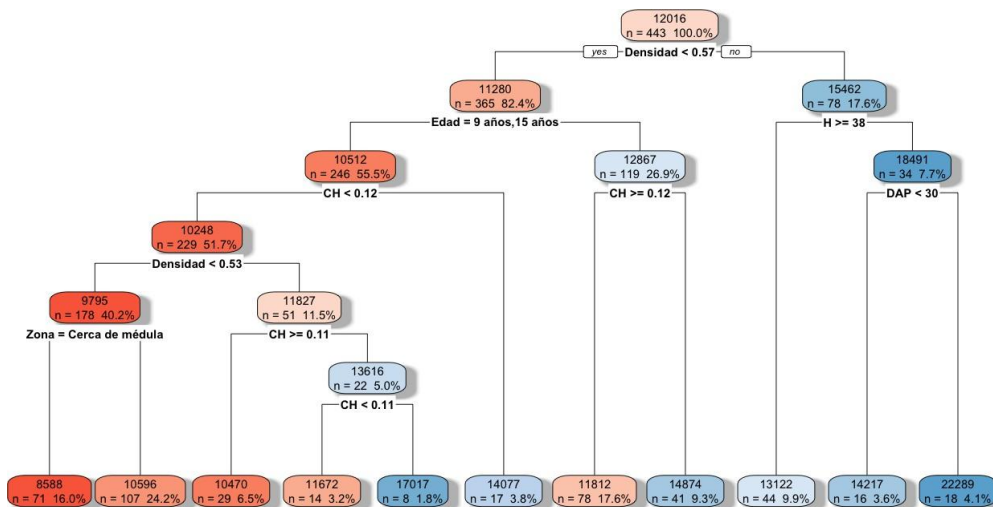
En el presente trabajo se busca caracterizar; lo cual explica la necesidad de incluir variables de interés tanto físicas como mecánicas. En este contexto, se implementó un árbol de decisión como enfoque alternativo, orientado a la clasificación y exploración de patrones en los datos. Este método permite identificar combinaciones de variables y umbrales con capacidad discriminante, sin asumir relaciones lineales ni distribuciones específicas, resultando especialmente útil para caracterizar el comportamiento del material y diferenciar grupos con propiedades mecánicas contrastantes.

Para la construcción del árbol de decisión se excluyeron las variables *espesor* y *ancho de las probetas*, dado que su inclusión podría sesgar la interpretación hacia características particulares del ensayo y no hacia la realidad estructural del material. Estas dimensiones son resultado del proceso de preparación de las muestras y no representan propiedades intrínsecas de la madera ni atributos relevantes para la estimación del MOE en condiciones operativas. Por lo tanto, se decidió eliminarlas con el fin de que el modelo refleje de manera más fiel los factores que realmente influyen en el comportamiento mecánico del *Eucalyptus grandis* en campo y en aplicaciones industriales.

El criterio de poda para el planteo del árbol, es que se precisan al menos 20 datos para dividir el nodo, generando una coherencia entre datos y divisiones; y la complejidad planteada es de más chico, a más grande el árbol.

Figura 32

Árbol de decisión para Módulo Elástico con método destructivo (MPa)



El árbol de regresión generado para explicar el MOE testigo identificó como predictores relevantes la densidad, el contenido de humedad (CH), la edad, la altura total del árbol, el DAP y la zona radial. La primera división del árbol se realizó según la densidad (umbral 0.57), lo cual confirma que esta es la variable más influyente en la rigidez: densidades superiores se asociaron sistemáticamente a MOE elevados (16.000-18.000 MPa), mientras que densidades menores derivaron en valores sustancialmente inferiores (9.000-12.000 MPa). Posteriormente, el CH y la zona radial refinaron la predicción del MOE, siendo las probetas con CH moderado y provenientes de zonas externas del fuste las que presentaron mayores valores. La edad también contribuyó a segmentar la rigidez, con diferencias entre los rodales de 9, 12 y 15 años, coherentes con la transición fisiológica entre madera juvenil y madura. El gráfico de complejidad mostró que el error relativo mínimo se alcanzó con un árbol de aproximadamente 7-10 divisiones, señalando un modelo estable y sin sobreajuste. En conjunto, el análisis confirma que el MOE está determinado por propiedades intrínsecas del material (densidad, humedad, posición radial) y por variables dendrométricas asociadas al estado de desarrollo del árbol, lo cual concuerda con la literatura sobre la variabilidad mecánica en *Eucalyptus grandis*.

4.8.1. Validación del árbol

El desempeño del árbol se evaluó mediante el error cuadrático medio de la raíz (RMSE), obteniéndose un valor de 5.298 MPa. Asimismo, se calculó el error cuadrático medio normalizado (NRMSE), el cual fue de 44,05% respecto al valor promedio de MOE. Este resultado indica que el modelo presenta un error relativo moderado, siendo utilizado

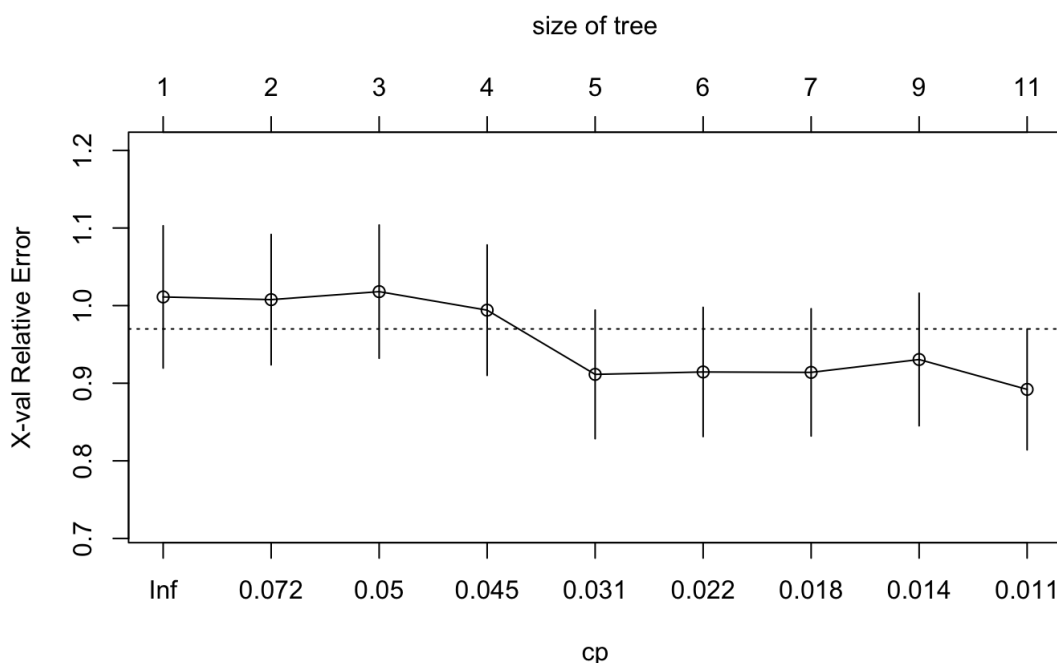
principalmente como herramienta exploratoria para identificar patrones de agrupamiento en los datos y no con un fin predictivo.

En cuanto al tamaño del árbol, la justificación puede observarse en la Figura 33. El árbol se truncó en el nivel a partir del cual la incorporación de nuevas particiones no produjo una reducción significativa del error de validación cruzada.

Asimismo, el tamaño muestral de cada nodo se mantuvo explícito, dado que resulta clave para interpretar la estabilidad y representatividad de las particiones obtenidas.

Figura 33

Gráfica de complejidad CP para la regresión planteada



El gráfico de complejidad asociado al árbol de regresión presenta la evolución del error relativo obtenido mediante validación cruzada (*X-val Relative Error*) en función del parámetro de complejidad (cp). Este parámetro controla el crecimiento del árbol, penalizando la incorporación de nuevas particiones: valores elevados de cp generan árboles más simples, mientras que valores menores permiten estructuras más ramificadas. La validación cruzada se utilizó para evaluar el desempeño del árbol de regresión y definir su complejidad óptima. Este procedimiento permite estimar el error del modelo sobre datos no utilizados en el ajuste, proporcionando una medida más realista de su capacidad de generalización. Para cada valor del parámetro de complejidad (cp), se calculó el error relativo promedio y su variabilidad. A partir de estos resultados, se aplicó el criterio de una desviación estándar, seleccionando el árbol más simple cuyo error no difiere significativamente del mínimo observado.

En el eje horizontal se representan los distintos valores de cp , junto con el tamaño correspondiente del árbol (número de nodos terminales), mientras que el eje vertical muestra el error relativo promedio calculado a partir de validación cruzada. Las barras verticales asociadas a cada punto indican la variabilidad del error, expresada como una desviación estándar.

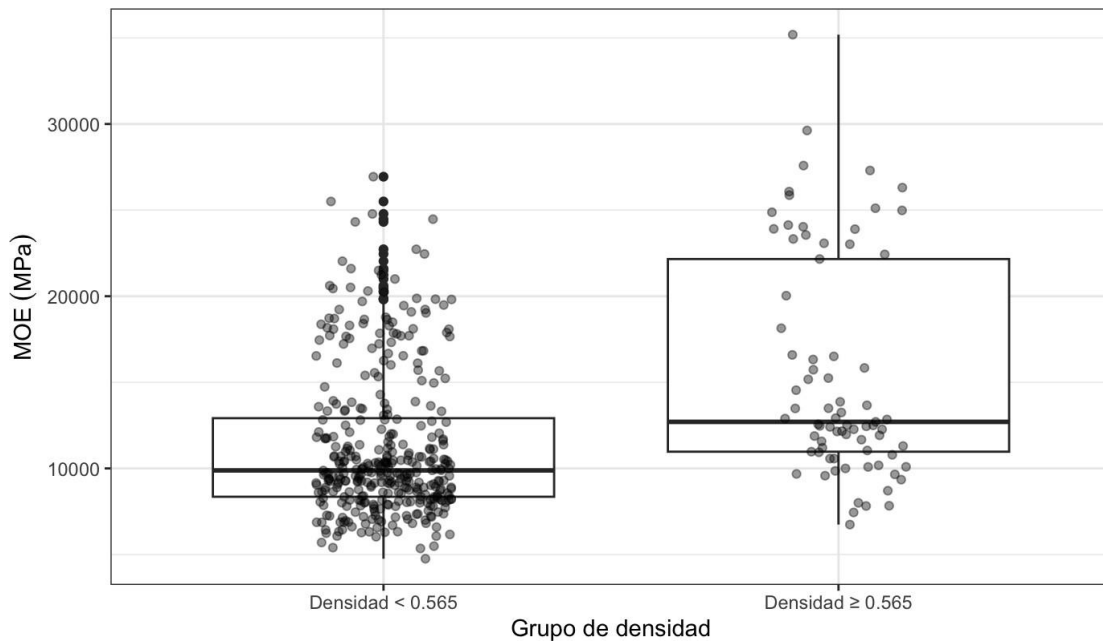
A partir del gráfico se observa que, para valores altos de cp , el árbol presenta un error relativo cercano a 1, lo que indica un ajuste limitado y una estructura excesivamente simple, incapaz de capturar adecuadamente la variabilidad del módulo de elasticidad. Al disminuir el valor de cp , el error relativo se reduce de forma progresiva, evidenciando una mejora en la capacidad explicativa del modelo a medida que se incorporan nuevas divisiones.

Sin embargo, a partir de un determinado umbral, la reducción adicional del error es marginal, a pesar del incremento en la complejidad del árbol. Siguiendo el criterio de una desviación estándar, representado por la línea punteada horizontal, se identifica un rango de valores de cp para los cuales el error del modelo no difiere significativamente del mínimo observado. En este contexto, se selecciona un árbol de complejidad intermedia, priorizando un balance adecuado entre desempeño del modelo e interpretabilidad, y evitando el sobreajuste asociado a estructuras excesivamente complejas.

Con el fin de validar la partición principal identificada por el árbol de decisión, se compararon los valores de módulo de elasticidad entre los grupos definidos por el umbral de densidad (0,565). Los resultados muestran diferencias altamente significativas entre ambos grupos. El grupo con densidad menor a 0,565 presentó un MOE medio de 11.280 MPa, mientras que el grupo con densidad mayor o igual a dicho umbral alcanzó un valor medio de 15.462 MPa. El test t de Welch evidenció diferencias estadísticamente significativas ($p = 3,52 \times 10^{-7}$), resultado que fue confirmado mediante el test no paramétrico de Wilcoxon ($p = 1,20 \times 10^{-10}$). Estos resultados respaldan la relevancia de la densidad como variable estructurante del comportamiento mecánico de la madera y validan la primera partición obtenida en el árbol de decisión.

Figura 34

Boxplot con MOE por grupos según umbral de densidad en primera ramificación



El boxplot del módulo de elasticidad en función del umbral de densidad identificado por el árbol de decisión muestra una clara diferenciación entre grupos. Las muestras con densidad mayor o igual a 0,565 presentan valores de MOE sistemáticamente superiores, con una mediana más elevada y una mayor dispersión, en comparación con el grupo de menor densidad. Si bien se observa una superposición parcial entre ambos grupos, la tendencia general evidencia un incremento del módulo de elasticidad asociado a mayores valores de densidad, lo cual resulta consistente con los resultados del análisis estadístico y respalda la relevancia de esta variable como principal factor explicativo del comportamiento mecánico.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar las propiedades mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis* en función de la edad del rodal y posición dentro del fuste. Asimismo, se evaluó la correlación entre métodos destructivos y no destructivos para la estimación del módulo de elasticidad (MOE). Esta caracterización se vio influenciada por efectos confundidos asociados no solamente a la edad; es por eso que la evaluación de los mismos es fundamental para poder asociar diferencias entre edades únicamente.

Se observaron diferencias significativas en el MOE entre árboles de 9 y 12 años, así como entre árboles de 12 y 15. En cambio, no se detectaron diferencias significativas entre árboles de 9 y 15 años. Este comportamiento no lineal sugiere un fuerte efecto del sitio sobre el desarrollo de las propiedades mecánicas de la madera.

De manera similar, se observaron diferencias significativas en los valores de MOE según la posición radial, desde la médula hacia la corteza. Los resultados indican la presencia de un gradiente creciente del módulo elástico en sentido radial, consistente con la transición de madera juvenil a madera más madura.

La densidad presentó un leve incremento a medida que los árboles crecen en edad. El análisis de correlación entre la densidad y el módulo de elasticidad, mostró que, a medida que el árbol envejece, el MOE resulta más complejo de explicar a partir de una única variable, lo que sugiere la influencia de otros factores estructurales y anatómicos.

En relación a la evaluación de métodos, los ensayos no destructivos Fakopp y Sylvatest mostraron una correlación moderada con el MOE mediante ensayos destructivos. Estos resultados, evidencian su potencial como herramientas para la estimación indirecta de propiedades mecánicas en condiciones de campo. Sin embargo, se evidencia la necesidad de incorporar otras variables intrínsecas del árbol para mejorar la precisión de las estimaciones. En este sentido, se sugiere explorar el uso de herramientas adicionales, como árboles de decisión o modelos predictivos.

Los resultados obtenidos son representativos de las condiciones y edades evaluadas en el presente estudio, por lo que su extrapolación a otros sitios, manejos silvícolas o turnos debe realizarse con cautela. Se evidenció un fuerte efecto asociado al sitio de evaluación, el cual fue diferente entre los rodales y estuvo asociado conjuntamente a la edad y al ambiente. Por otro lado, se identificaron limitaciones asociadas al origen genético del material, ya que los árboles de 9 años difieren de los de 12 y 15 años, y corresponden a material de semilla y no clonal. Esto implica una mayor variabilidad entre individuos dentro de un mismo rodal. Asimismo, se observaron diferencias en el manejo

silvícola entre rodales, particularmente en las edades de poda, lo que influyó en el desarrollo de los árboles.

Los resultados aportan información relevante para la clasificación estructural de la madera de *Eucalyptus grandis* y respaldan el uso de métodos no destructivos como herramientas complementarias para la evaluación mecánica en plantaciones comerciales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araya, R., Guillaumet, A., Do Valle, A., Duque, M. P., González, G., Cabrero, J. M., De León, E., Castro, F., Gutiérrez, C., Negrão, J., Moya, L., & Guindos, P. (2022). Development of sustainable timber construction in Ibero-America: State of the art in the region and identification of current international gaps in the construction industry. *Sustainability*, 14(3), Artículo e1170. <https://doi.org/10.3390/su14031170>
- Baez Albano, K. Y. (2023). *Evaluación a turno final del efecto del raleo sobre el crecimiento y propiedades de la madera de Eucalyptus grandis* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/40381>
- Bal, B. C., Bektaş, İ., Tutuş, A., & Kaymakçı, A. (2011). The within-tree variation in some physical properties in eucalyptus wood (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) grown in Karabucak region. *Düzce University Faculty of Forestry Journal of Forestry*, 7(2), 82-88. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/313184>
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2006). Productividad de diferentes especies de *Eucalyptus* sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera. En M. Bemhaja & Ó. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de areniscas INIA Tacuarembó* (pp. 305-312). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3008/1/18429250309101451.pdf>
- Barreiro, S., & Hirsch, T. (2011). *Protección de la madera*. Universidad de la República. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/4703>
- Batista, D. C., Oliveira, J. T. S., Paes, J. B., Nisgoski, S., & Bolzón de Muñiz, G. I. (2018). Effect of the Brazilian process of thermal modification on physical properties of *Eucalyptus grandis* juvenile wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(4), 715-724. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005041701>
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold.
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., McDonald, M. W., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of Australia* (5th ed.). CSIRO.
- Bucur, V. (1995). *Acoustics of wood*. Taylor & Francis.

- Bulman Hartkopf, C., Winck, R. A., Fassola, H. E., Aquino, D. R., & Stefani, P. M. (2021). Variación radial de la densidad a tres alturas de fuste de 5 clones de *Eucalyptus*. En M. Á. García & S. O. Ramos (Coords.), *XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos* (pp. 183-187). INTA.
[https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/12725/INTA_CR_Misiones_EEAMontecarlo_Bulman_Kartkopf_C_Variaci%
 c3%b3n_radial_densidad_5_clones_eucalyptus.pdf](https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/12725/INTA_CR_Misiones_EEAMontecarlo_Bulman_Kartkopf_C_Variaci%c3%b3n_radial_densidad_5_clones_eucalyptus.pdf)
- Bulman-Hartkopf, C., Winck, R. A., Aquino, D. R., Fassola, H. E., & Stefani, P. M. (2024). Densidad y proporción de albura y duramen en nuevos clones de *Eucalyptus* spp. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, Artículo e2424.
<http://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2024.24>
- Caamaño Lamela, L., & Stirling Estigarribia, M. J. (2009). *Evaluación del crecimiento de clones de Eucalyptus grandis en el litoral del Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20689>
- Calonego, F. W., Severo, E. T. D., & Latorraca, J. V. F. (2014). Effect of thermal modification on the physical properties of juvenile and mature woods of *Eucalyptus grandis*. *Floresta e Ambiente*, 21(1), 108-113.
<https://www.floram.org/article/10.4322/floram.2014.004/pdf/floram-21-1-108.pdf>
- Cherelli, S. G., Sartori, M. M. P., Próspero, A. G., & Ballarin, A. W. (2018). Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: Non-conventional approach to wood quality. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(1), 425-438.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765201820160195>
- Dirección General Forestal. (2024). *Resultados de la Cartografía Forestal Nacional 2024*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/CARTOGRAFIA%202024/Informe%20de%20resultados%202025.pdf>
- Doldán, J. (2003). *Indicadores de calidad de madera Eucalyptus grandis de Río Negro, Uruguay: Contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibras*. LATU; JICA. https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=572
- Donaldson, L. (2008). Microfibril angle: Measurement, variation and relationships: A review. *IAWA Journal*, 29(4), 345-386. <https://scispace.com/pdf/microfibril-angle-measurement-variation-and-relationships-a-524gkdm8w.pdf>

- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* [Mapa]. MAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay%201.1.000.000_0.pdf
- Elissetche, J. P., Alzamora, R. M., Espinoza, Y., Emhart, V., Pincheira, M., Medina, A., & Rubilar, R. (2024). Wood basic density assessment of Eucalyptus genotypes growing under contrasting water availability conditions. *Forests*, 15(1), Artículo e185. <https://doi.org/10.3390/f15010185>
- Fagúndez Pivetta, P. (2021). *Efecto sobre el contenido de humedad de astillas y rollos de Eucalyptus spp. del secado asistido bajo techo traslúcido* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/33091>
- Food and Agriculture Organization. (1979). *Eucalypts for planting*. <https://www.fao.org/3/ac459e/ac459e.pdf>
- Galligan, W., Kerns, J., & Brashaw, B. K. (2015). Machine grading of lumber. En R. J. Ross (Ed.), *Nondestructive evaluation of wood* (2ª ed., pp. 115-139). USDA.
- García Freire, G., & Tarigo Scremini, J. (2006). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos plantaciones de Eucalyptus grandis Hill (Ex Maiden)* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29255>
- Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. En R. J. Ross (Ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 4-1-4-19). USDA.
- Gonçalves, J. L. M., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., Ferraz, S. F. B., Lima, W. P., Brancalion, P. H. S., Hubner, A., Bouillet, J. P. D., Laclau, J. P., Nouvellon, Y., & Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Google. (2025a). [Predio Achara, Treinta y Tres, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 10 de junio de 2025, de https://goo.gl/maps/N1UJKv6XYwgvH3SW6?g_st=aw
- Google. (2025b). [Predio Azotea de Ramírez, Treinta y Tres, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 10 de junio de 2025, de https://goo.gl/maps/aiW7Qjb4pSh6q8pt9?g_st=aw

- Google. (2025c). [Predio Burgos, Cerro Largo, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 10 de junio de 2025, de https://goo.gl/maps/sD3jFcwQ5MKtCKNw6?q_st=aw
- Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2". (2004). *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis Maiden del norte de Uruguay*. https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=558
- Hein, P. R. G., Silva, J. R. M., & Brancheriau, L. (2013). Correlations among microfibril angle, density, modulus of elasticity, modulus of rupture and shrinkage in 6-year-old Eucalyptus urophylla × E. grandis. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(2), 171-182. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000014>
- Hoadley, R. B. (2000). *Understanding wood: A craftsman's guide to wood technology*. Taunton Press.
- Ilic, J. (2001). Variation of the dynamic elastic modulus and wave velocity in the fibre direction with other properties during the drying of Eucalyptus regnans F. Muell. *Wood Science and Technology*, 35, 157-166. <https://doi.org/10.1007/s002260000075>
- Instituto de Estructuras y Transporte. (2014). *Normativa y mercado de la madera estructural en Uruguay*. <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/2014-Informe%2001.pdf>
- Ley nº 15.939: *Ley forestal: Fondo forestal: Recursos naturales*. (1987). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
- Meskimen, G., & Francis, J. K. (s.f.). *Rose gum eucalyptus*. USDA. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/eucalyptus/grandis.htm
- Methol, R. (2008). *SAG eucalyptus: Sistema de apoyo a la gestión de plantaciones de Eucalyptus orientadas a la producción de celulosa en Uruguay*. INIA. <https://inia.uy/sites/default/files/publications/2025-10/ST-173-2008.pdf>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Geoffrey Vining, G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6th ed.). Wiley.
- Moreno, K., Achinelli, F., Stefani, P., Monteoliva, S., & Spavento, E. (2024). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* (Argentina) y su vinculación con la calidad de sitio y edad de plantación. *Bosque (Valdivia)*, 45(3), 427-436. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002024000300427>

- Moya, L., Pérez Gomar, C., Vega, A., Sánchez, A., Torino, I., & Baño, V. (2019). Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 21(3), 327-340. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000305>
- Muñoz-Acosta, F. (2012). Determinación del módulo elástico de Young en tableros contrachapados de madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(23), 29-34. <https://hdl.handle.net/2238/5312>
- Muthike, G., Ali, G., Oduor, N., Munene, P., & Githiomi, J. (2022). Corrective interventions to end-splitting and surface cracking in Kenya-grown *Eucalyptus grandis* poles. *Open Journal of Forestry*, 12(3), 380-392. <https://doi.org/10.4236/ojf.2022.123021>
- Oberschelp, J., Marcó, M., Sánchez Acosta, M., & Mastrandrea, C. (2007, 3-5 de julio). *Propiedades de la madera de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden, E. dunnii Maiden y E. saligna Sm. relacionadas a usos sólidos de alto valor* [Contribución]. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007, Buenos Aires.
- Olivera Benavidez, C., & Cárdenas Rodríguez, P. (2007). *Evaluación de las propiedades físicas fundamentales, mecánicas y clasificación visual de tablas de madera de una plantación de Eucalyptus grandis Maiden ex Hill del departamento de Durazno de 26 años de edad* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/27762>
- Palermo, G. P. M., Latorraca, V. F., De Carvalho, A. M., Colonego, F. W., & Severo, E. T. D. (2015). Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73, 775-780. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4>
- Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., & Santos, L. C. (2013). Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. *Scientia Forestalis*, 41(98), 217-225. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr98/cap07.pdf>
- Pérez del Castillo, Á. (2001). *Propiedades mecánicas y calidad de madera de Eucalyptus grandis del norte de Uruguay*. LATU; JICA. https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=567

- Pérez del Castillo, Á., & Venturio Cammarota, A. (2003). *Resumen de propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis, Pinus elliottii y Pinus taeda de distintas zonas del Uruguay*. LATU; JICA.
https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=577
- Pérez del Castillo, Á., De Castro, R., & Ohta, S. (2000). *Ensayos de propiedades mecánicas de Pinus taeda por seis métodos no destructivos*. LATU; JICA.
https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=562
- Piter, J. C. J. (2003). *Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural: Desarrollo de un método para el Eucalyptus grandis de Argentina* [Disertación doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Sedici.
https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1344/Tesis_completa.pdf?sequence=11&isAllowed=y
- Ramos, S., & Garin, R. (2022). Respuesta del crecimiento del eucalipto a las temperaturas. En A. I. Irigoyen, M. G. Cogliati, P. A. Paez, M. F. Reyes & L. Serio (Eds.), *XIX Reunión Argentina de Agrometeorología: Producción armónica y sustentable* (pp. 57-58). AADA.
https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/23919/INTA_CRE_ntrERios_EEAConcordia_Ramos_SO_Respuesta_del_crecimiento_del_Eucalip_to_a_la_temperatura.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Raymond, C. A. (2002). Genetics of Eucalyptus wood properties. *Annals of Forest Science*, 59(5-6), 525-531. <https://doi.org/10.1051/forest:2002037>
- Resquin, F., Baez, K., De Freitas, S., Passarella, D., Coelho-Duarte, A. P., & Rachid-Casnati, C. (2024). Impact of thinning on the yield and quality of *Eucalyptus grandis* wood at harvest time in Uruguay. *Forests*, 15(5), Artículo e810.
<https://doi.org/10.3390/f15050810>
- Savidge, R. A. (2003). Tree growth and wood quality. En J. R. Barnett & G. Jeronimidis (Eds.), *Wood quality and its biological basis* (pp. 1-29). Blackwell Publishing.
- Siau, J. F. (1995). *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Simpson, W., & TenWolde, A. (1999). Physical properties and moisture relations of wood. En United States Department of Agriculture (Ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 3-1-3-24). Forest Products Laboratory.

- Sseremba, O. E., Mugabi, P., & Banana, A. Y. (2016). Within-tree and tree-age variation of selected anatomical properties of the wood of Ugandan-grown *Eucalyptus grandis*. *Forest Products Journal*, 66(7-8), 433-442.
<https://fpj.kglmeridian.com/view/journals/fpro/66/7-8/article-p433.xml?body=PD F>
- Stackpole, D. J., Vaillancourt, R. E., Downes, G. M., Harwood, C. E., & Potts, B. M. (2010). Genetic control of kraft pulp yield in *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(5), 917-927. <https://doi.org/10.1139/X10-035>
- Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials*. (2025, 1 de setiembre). ASTM. <https://store.astm.org/d4442-20.html>
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: Structure, properties, utilization*. Chapman & Hall.
- Tuset, R., & Durán, F. (1979). *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*. Hemisferio Sur.
- Uruguay XXI. (2025). *Sector forestal en Uruguay*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/360c13a465dd9ee9bdc985fef09c5d1eff4c7bce.pdf>
- Wang, X., & Carter, P. (2015). Acoustic assessment of wood quality in trees and logs. En R. J. Ross (Ed.), *Nondestructive evaluation of wood* (2ª ed., pp. 87-101). USDA.
- Washusen, R., & Ilic, J. (2001). Relationship between transverse shrinkage and tension wood from three provenances of *Eucalyptus globulus* Labill. *European Journal of Wood and Wood Products*, 59, 85-93.
<https://doi.org/10.1007/s001070050480>
- Zobel, B. J., & Van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood variation: Its causes and control*. Springer.

7. ANEXO

Estudio de suelos en estudio

En Uruguay existen suelos clasificados como de prioridad forestal. De acuerdo con el Artículo 5 literal A de la Ley Forestal n° 15.939 promulgada en 1987, se consideran de prioridad forestal “aquellos suelos que, por sus propiedades, aptitud, clima, ubicación y demás características, son inadecuados para cualquier otra explotación o destino de carácter permanente y provechoso” (art. 5).

En el presente trabajo se analizan suelos de prioridad forestal Coneat 2.14.

Los suelos del grupo 2.14 corresponden principalmente a sierras no rocosas, con relieve ondulado fuerte a quebrado o escarpado, con presencia de afloramientos rocosos y pendientes generalmente comprendidas entre 3 y 12%. El material generador está constituido por areniscas, a veces silicificadas, y tillitas de la Formación San Gregorio – Tres Islas, así como por mantos profundos de alteración de rocas cristalinas (Durán, 1976).

En términos de clasificación de suelos, predominan Luvisoles Ócricos Úmbricos (en algunos casos melánicos) típicos, ocasionalmente abruptos, de textura arenosa a franco arenosa ródica (Praderas Arenosas rojas) (Durán, 1976). Estos se encuentran asociados a Brunosoles Dístricos Lúvicos, arenoso francos y arenosos, moderadamente profundos y ródicos (Praderas Arenosas), así como a Litosoles Dístricos o Subéutricos Ócricos/Úmbricos, de textura arenoso franca a franca, e Inceptisoles Úmbricos, franco arenosos gravillosos (Durán, 1976).

Este grupo de suelos se distribuye en una extensa región de sedimentos gruesos pertenecientes a la Formación Tres Islas, que se extiende desde Arévalo, pasando por Tres Islas y Cerro de las Cuestas, hasta el Paso de la Cruz sobre el río Tacuarí (Ministerio de Agricultura y Pesca [MAP], 1976). Asimismo, existen áreas discontinuas asociadas a materiales de alteración de rocas cristalinas en distintos puntos geográficos, entre ellos Isla Patrulla, Zapicán, Tupambaé y la región serrana comprendida entre la ruta 26 y Paso Centurión, en el departamento de Cerro Largo (Durán, 1976). La vegetación natural predominante corresponde a pradera estival, y el uso actual del suelo es principalmente pastoril (Durán, 1976). Estos suelos integran las unidades Tres Islas y parte de Sierra de Polanco, según la carta de reconocimiento de suelos a escala 1:1.000.000 (D.S.F.), con un Índice de Productividad de 61 (Durán, 1976).

La información edáfica y topográfica disponible según el Durán (1976) indica diferencias relevantes en la susceptibilidad a la erosión entre las unidades de mapeo Tres Islas y

Sierra de Polanco. En la unidad Tres Islas, el índice de erodabilidad (K) es de 0,51, lo que refleja una alta susceptibilidad a la erosión. No obstante, la pendiente moderada (6–12%) y una tolerancia a la pérdida de suelo (T) relativamente elevada ($7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) permiten un manejo productivo con riesgo controlable, siempre que se implementen prácticas adecuadas de conservación (Durán, 1976; García Préchac, 1992). Por su parte, en la unidad Sierra de Polanco el índice de erodabilidad varía entre 0,23 y 0,53, con pendientes más pronunciadas (10–16%) y una tolerancia a la pérdida de suelo significativamente menor ($T = 2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Esta combinación indica una mayor vulnerabilidad a los procesos erosivos y una capacidad limitada de recuperación del suelo, lo que requiere estrategias de manejo más restrictivas (Durán, 1976, 1985; García Préchac, 1992). En consecuencia, según los autores, la unidad Tres Islas presenta condiciones que permiten usos relativamente más intensivos bajo un manejo conservacionista, mientras que la unidad Sierra de Polanco demanda prácticas de uso más cautelosas y estrictas medidas de conservación para evitar procesos de degradación. Estas características determinan que los suelos Coneat 2.14 sean considerados de prioridad forestal, aunque en algunos casos requieren autorización previa para la implantación de actividades forestales (Durán, 1976, 1985; García Préchac, 1992). Estas características determinan que los suelos Coneat 2.14 sean considerados de prioridad forestal, aunque en algunos casos requieren autorización previa para la implantación de actividades forestales (Durán, 1976, 1985; García Préchac, 1992).

En el presente proyecto se trabaja con tres predios: Achara, Azotea de Ramírez y Burgos. Los predios Achara y Azotea de Ramírez se encuentran en el departamento de Treinta y Tres, mientras que Burgos se localiza en el departamento de Cerro Largo.

El predio Achara se ubica a 27 km al oeste de la ciudad de Vergara, en la cuarta sección catastral del departamento de Treinta y Tres. Por su parte, Azotea de Ramírez se localiza aproximadamente 20 km al noroeste de Estación Rincón, en la tercera sección catastral del mismo departamento. Ambos predios se encuentran en una zona con importante actividad forestal, donde las características de los suelos permiten el desarrollo de este rubro productivo.

En términos generales, el este del departamento de Treinta y Tres limita con la Laguna Merín, donde desembocan los ríos Cebollatí y Tacuarí. Se trata de una región caracterizada por la presencia de humedales y esteros, que albergan una importante diversidad de flora y fauna. Los suelos predominantes corresponden a los grupos Coneat 3 y 4, donde la producción arrocerá tiene un papel destacado. Para el desarrollo de esta actividad se han construido numerosos canales de riego y se ha realizado la

sistematización de chacras.

Actualmente, los principales sistemas productivos de la zona incluyen arroz en rotación con pasturas, generalmente asociados a sistemas ganaderos intensivos, junto con áreas de ganadería extensiva. También existen zonas localizadas al oeste de la laguna con suelos Coneat 2, donde predominan la ganadería y la forestación. Las principales vías de acceso corresponden a las rutas nacionales 8, 17, 18, 19 y 91. Asimismo, se destaca una amplia oferta de servicios vinculados a la actividad arrocerá, incluyendo maquinaria especializada, personal capacitado e industrias asociadas.

El predio Burgos se encuentra ubicado a 28 km al este de la ciudad de Melo, en la duodécima sección catastral del departamento de Cerro Largo.

En esta región de Cerro Largo se observa una gran diversidad de paisajes y recursos naturales, lo que determina un uso variado del territorio. Existen suelos Coneat 3 y 4 asociados a la región de la Laguna Merín, suelos del grupo 2 vinculados a las zonas serranas, y suelos de los grupos 6, 8, 13 y G03 en áreas próximas al río Negro. Las principales actividades productivas incluyen ganadería, agricultura, arroz y forestación.

Referencias bibliográficas de Anexo

Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* [Mapa].

MAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay%201.1.000.000_0.pdf

Durán, A. (1985). *Los suelos del Uruguay*. Hemisferio Sur.

García Préchac, F. (1992). *Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos: 3ª aproximación*. INIA.

<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2929/1/111219220807114033.pdf>

Ley nº 15.939: *Ley forestal: Fondo forestal: Recursos naturales* (1987). IMPO.

<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>

Ministerio de Agricultura y Pesca. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* [Mapa]. Dirección de Suelos y Fertilizantes.

https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay%201.1.000.000_0.pdf