

Universidad de la República
Centro Universitario Regional Noreste
Ingeniería Forestal

**EFECTO DE LA DENSIDAD ARBÓREA SOBRE PARÁMETROS
DASOMÉTRICOS DE *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden EN
SISTEMAS SILVOPASTORILES**

Romina Sanchis Cooper

Tutor:

Ing. Agr. MSc. Valentina Benítez

Co-tutores:

Zoot. PhD. Jean Kássio Fedrigo

Ing. Agr. MSc. Paulina Siri

Tacuarembó, 26 de Mayo de 2025

PÁGINA DE APROBACIÓN

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL NORESTE – SEDE TACUAREMBÓ

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Trabajo Final de Ingeniería Forestal:

Título:

EFFECTO DE LA DENSIDAD ARBÓREA SOBRE PARÁMETROS DASOMÉTRICOS DE *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

Autor:

Romina Sanchis Cooper

Tutor:

Ing. Agr. MSc Valentina Benítez

Co-tutor:

Zoot. PhD Jean Kássio Fedrigo

Ing. Agr. MSc Paulina Siri

Puntaje: _____

Tribunal:

Profesor.....(nombre y firma).

Profesor.....(nombre y firma).

Profesor.....(nombre y firma).

FECHA:

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a mi tutora, Valentina Benítez, por su dedicación, orientación constante y compromiso durante todo el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento incondicional y motivación fue fundamental para avanzar con seguridad y claridad en cada etapa del proceso.

A mis co-tutores, Jean y Paulina, por su valioso apoyo, por compartir su experiencia y por enriquecer este trabajo con sus aportes.

A Carloncho y Nico, y a todos los involucrados que colaboraron desinteresadamente con el trabajo tanto de campo como con aportes técnicos para que sea posible la realización de este proyecto.

A todos los profesores de la universidad que formaron parte de mi formación académica, gracias por cada clase, consejo y desafío que me ayudaron a crecer profesional y personalmente. También a todos los funcionarios de la universidad quienes hacen parte de nuestro día a día como estudiantes a lo largo de estos años.

A mis compañeros y a los que se volvieron amigos de facultad, quienes fueron parte esencial de este camino, por su compañía, risas y apoyo constante. Y a mis amigos de toda la vida, que a pesar de la distancia nunca dejaron de estar presentes, acompañándome en cada paso con palabras de aliento.

Por último y más importante, a mis padres, Gustavo y Ebelyn, a mi hermano Aby, por su amor incondicional, por estar presentes cada día, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, y por sostenerme siempre. Esta meta también es de ustedes. A toda mi familia, por acompañarme con cariño y aliento constante, y por demostrarme siempre que no estoy sola en este recorrido.

¡Gracias!

RESUMEN

El presente trabajo busca ampliar el conocimiento del componente arbóreo en los sistemas silvopastoriles, evaluando cómo afecta la densidad arbórea a las variables dendrométricas y dasométricas de *Eucalyptus grandis* en la región noreste de Uruguay. Se llevó a cabo en la plataforma experimental ubicada en el paraje Puntas de Sauce en el departamento de Cerro Largo, donde en 2020 se instaló un sistema silvopastoril con dos tratamientos (160 árboles/ha - 229 árboles/ha) diferentes en cuanto a diseño y densidad. Se hicieron dos inventarios a los 2,5 y 3,6 años, donde se midieron variables dendrométricas del fuste y de la copa, como diámetro a la altura del pecho, altura total, diámetro de copa y altura a la primera rama viva. A partir de éstas se calculó área transversal, volumen aparente, longitud de copa viva, porcentaje de copa y la relación diámetro de copa sobre diámetro a la altura del pecho (dc/DAP), de forma individual y luego se estimó el área basal y el volumen por hectárea. Estas variables se describieron y compararon entre tratamientos con distintas densidades. Los resultados arrojaron diferencias no significativas estadísticamente con un $p\text{-valor} > 0,005$, excepto para las variables dasométricas a los 3,6 años. Al comparar los resultados obtenidos con la bibliografía consultada, se concluye de que aún no se ven diferencias entre densidades porque los árboles disponen de suficiente espacio libre para crecer, estando a una edad tan temprana. Se sugiere seguir realizando inventarios posteriores para poder realizar nuevamente estas comparaciones y contrastar los resultados en edades más avanzadas, cuando los árboles hayan cerrado el dosel.

Palabras clave: Producción silvopastoril, componente arbóreo, variables de fuste, variables de copa, variables poblacionales.

ABSTRACT

This study aims to expand the knowledge of the tree component in silvopastoral systems by evaluating how tree density affects the dendrometric and stand measurement variables of *Eucalyptus grandis* in the northeast region of Uruguay. It was carried out on the experimental platform located in the Puntas de Sauce area in the Cerro Largo department, where in 2020 a silvopastoral system was established with two treatments (160 trees/ha and 229 trees/ha) differing in design and density. Two inventories were conducted at 2.5 and 3.6 years, where dendrometric variables of the stem and crown were measured, such as diameter at breast height, total height, crown diameter, and height to the first live branch. From these, cross-sectional areas, apparent volume, live crown length, crown percentage, and the ratio of crown diameter to diameter at breast height (cd/DBH) were calculated individually, and then basal area and volume per hectare were estimated. These variables were described and compared between treatments with different densities. The results showed no statistically significant differences with a p-value > 0.005 , except for the stand variables at 3.6 years. Comparing the results with the reviewed literature, it was concluded that differences between densities are not yet observed because the trees have sufficient free space to grow at such an early age. It is suggested to continue conducting subsequent inventories to perform these comparisons again and to contrast the results at more advanced ages when the trees have closed the canopy.

Key words: Silvopastoral production, tree component, stem variables, canopy variables, population variables.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Sector Forestal en Uruguay.....	3
2.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i>	5
2.1.1.1 Características generales.....	5
2.1.1.2 Descripción botánica.....	5
2.1.1.3 Origen y distribución.....	6
2.1.1.4 Requerimientos ambientales.....	7
2.1.1.5 Producción en Uruguay y adaptación a sistemas silvopastoriles.....	7
2.2 Sistemas Silvopastoriles.....	8
2.2.1 Componentes del sistema silvopastoril.....	10
2.2.1.1 Componente arbóreo.....	10
2.2.1.2 Componente herbáceo.....	11
2.2.1.3 Componente animal.....	13
2.2.2 Interacción Árbol-Pasto-Ganado.....	14
2.2.2.1 Efecto del árbol en el animal.....	14
2.2.2.2 Efecto de la sombra de árboles sobre el forraje.....	15
2.3 Efecto de la densidad arbórea en los parámetros dendrométricos y dasométricos... 16	16
2.3.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes.....	16
2.3.2 Parámetros dendrométricos de copa.....	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Descripción de sitio de estudio.....	21
3.2 Descripción de diseño experimental.....	22
3.3 Datos de inventarios.....	23
3.4 Análisis estadístico.....	26
4. RESULTADOS.....	28
4.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes.....	28
4.1.1 Diámetro a la altura del pecho.....	28
4.1.2 Altura total.....	30
4.1.3 Área transversal y Área Basal.....	32
4.1.4 Volumen Aparente.....	34
4.2 Parámetros dendrométricos de copa.....	38
4.2.1 Diámetro de copa.....	38
4.2.2 Longitud de copa viva.....	39
4.2.3 Porcentaje de copa.....	41
4.2.4 Índice de espacio vital.....	43

5. DISCUSIÓN.....	46
5.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes	46
5.2 Parámetros dendrométricos de copa	48
6. CONCLUSIONES.....	51
7. PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
8. REFERENCIAS	53
9. ANEXO	65

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal en Uruguay ha experimentado un aumento constante y significativo en la economía del país a partir de la implementación de la segunda Ley Forestal del año 1987 (N°15939), dando lugar al crecimiento y diversificación de la cadena productiva [1] [2]. Esta ley reforzó las políticas e incentivos económicos propuestos en la primera ley (N° 13723 de 1968) y además definió sitios con condiciones favorables para desarrollar plantaciones, garantizando las buenas prácticas forestales para satisfacer las demandas de sostenibilidad, aumentando significativamente el desarrollo de este sector [1].

Si bien Uruguay es un país tradicionalmente agrícola-ganadero, la integración de los árboles como bosques de sombra y abrigo para el ganado y cultivos, es una práctica que se ha realizado históricamente con el fin de aumentar la producción agropecuaria, sin considerar la combinación de rubros y en la producción de madera como tal [3]. Aunque desde 1940, se presentan estudios que mencionan la importancia de plantar cortinas rompe vientos, bosques de sombra y protección y presentando modelos que avalan esta necesidad [3], el primer registro de este sistema integrado con el fin de diversificar ingresos data del año 1960 [4]. Sin embargo, en otros países esta actividad integrada se planifica y diseña previo a la plantación con el fin de aumentar la productividad y diversificar la actividad, optimizando el resultado económico en su conjunto [5]. La necesidad de buscar alternativas para mejorar el aprovechamiento de la tierra a través del uso eficiente y sostenible de los recursos naturales llevó a organismos nacionales e internacionales [6] a investigar a partir de bases técnicas la implementación de un nuevo “modelo productivo” [7].

En este sentido, surgen los sistemas silvopastoriles (SSP), los cuales se estima que a nivel mundial alrededor de 3,2 millones de km² están ocupados por estos [8], con el objetivo de aprovechar los recursos de forma más eficiente, integrando en una misma unidad productiva árboles, ganado y pasturas [2] optimizando el uso del recurso suelo y promoviendo interacciones beneficiosas entre estos componentes [3]. Sin embargo, presentan grandes desafíos ya que requieren de prácticas de manejo específicas por las múltiples interacciones entre los componentes, que no pueden ser tratados como factores aislados dado el carácter de integración que supone este tipo de sistemas [9].

En este trabajo nos centraremos específicamente en el componente arbóreo, ya que es clave en estos sistemas debido a su capacidad para influir en la productividad y estabilidad del ecosistema. Los árboles no solo ofrecen sombra y protección para el ganado, sino que también mejoran la fertilidad del suelo, regulan el microclima, contribuyen a la captura de carbono y brindan una fuente adicional de productos forestales. Sin embargo, su integración en sistemas productivos debe ser manejada de manera cuidadosa, ya que los árboles pueden competir con las especies herbáceas por recursos como luz, agua y nutrientes [10]. Por esto, es importante definir previamente el objetivo productivo del SSP ya que de él dependerá la elección de la especie arbórea, la densidad y diseño de plantación [11], y las decisiones respecto al manejo de los árboles que ayuden a adoptar técnicas sustentables de producción, que hagan rentable y beneficioso al sistema en el corto y largo plazo [12].

Estudiar el crecimiento y desarrollo de los árboles es fundamental para comprender su impacto en el sistema. Entre las herramientas más efectivas para este análisis están las variables de fuste y de copa, las cuales permiten evaluar el crecimiento, la estructura y la productividad de los árboles y su interacción con los demás componentes, en función de su densidad y espaciamiento [13]. Variables como el diámetro a la altura del pecho, la altura total de los árboles, el área basal, diámetro y longitud de copa, entre otras, son indicadores clave para determinar el estado de los árboles, su influencia en el sotobosque y la producción forrajera [14]. El estudio de estas variables no solo facilita la toma de decisiones sobre el manejo del sistema, sino que también aporta información crítica para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles [15].

En este contexto, la presente tesis se propone analizar cómo la densidad arbórea influye en las variables dendrométricas y dasométricas, lo cual permitirá generar información que aporte a la toma de decisiones para optimizar los beneficios de los SSP, con especial énfasis en el diseño de plantación.

La hipótesis de este estudio plantea que, dentro de un sistema silvopastoril, una menor densidad arbórea genera cambios en las variables dendrométricas del fuste y de la copa de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden, resultando en árboles con mayor diámetro y desarrollo de copa y menor altura en comparación con densidades más altas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la densidad arbórea en parámetros dendrométricos y dasométricos de fuste y de copa en sistemas silvopastoriles.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Determinar la influencia de la densidad arbórea en sistemas silvopastoriles sobre las variables dendrométricas de fuste: diámetro a la altura del pecho, altura total, área transversal y volumen aparente de madera.
2. Evaluar el efecto de la densidad arbórea en sistemas silvopastoriles sobre variables dendrométricas de copa: diámetro de copa, altura de copa y porcentaje de copa viva.
3. Evaluar el efecto de la densidad arbórea en sistemas silvopastoriles sobre parámetros dasométricos de fuste: área basal y volumen por hectárea.
4. Evaluar cómo la densidad arbórea influye en la relación entre el diámetro a la altura del pecho y el diámetro de la copa.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sector Forestal en Uruguay

En Uruguay, el desarrollo del sector forestal, así como la posterior conformación de polos industriales se sustenta en un marco institucional sólido establecido por la Ley Forestal N° 15.939, promulgada en el año 1987 y ejecutada por la Dirección General Forestal - DGF, dependiente del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - MGAP. Esta ley constituye la base de la política forestal nacional y establece dos objetivos principales: la promoción de plantaciones forestales y la conservación del bosque nativo. A través de esta normativa se orienta el uso y manejo de los recursos forestales bajo principios de sostenibilidad, declarando “*De interés nacional la defensa, el mejoramiento, la ampliación, la creación de los recursos forestales, el desarrollo de las industrias forestales y, en general, de la economía forestal*” [16].

La implementación de la ley marcó un punto de inflexión en la dinámica forestal del país. En 1987 existían menos de 50 mil hectáreas forestadas, mientras que en 2021 supera el 1,1 millón de hectáreas lo que representa el 6,21% de la superficie total del territorio nacional destinada a plantaciones forestales [17]. Estas plantaciones están compuestas por especies exóticas del género *Eucalyptus* y *Pinus* [18], aunque también se registran otras como *Salix sp.*, *Populus sp.* y una mezcla de especies existentes en otros bosques plantados en el país. En el mismo año, *E. grandis* era la especie más plantada con 256.079 ha, seguida por *Eucalyptus dunnii* Doncella con 225.096 ha, *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Engelm. 145.000 [19].

El crecimiento sostenido de las plantaciones ha estado acompañado por criterios técnicos y administrativos para la identificación de suelos adecuados para la actividad forestal, integrando dos conceptos fundamentales: aptitud y prioridad forestales [20]. El concepto de aptitud forestal, definido en el Artículo 3 de la Ley, se refiere a aquellos suelos que presentan condiciones físicas favorables para el crecimiento y desarrollo de los bosques, como buen drenaje, adecuada capacidad de enraizamiento y baja fertilidad natural. En complemento, el Artículo 5 agrega el concepto de prioridad forestal, refiriéndose a suelos que, por su aptitud, características edáficas, climáticas y su ubicación, resultan inadecuados para otros usos productivos de carácter permanente y provechoso, y, por lo tanto, son considerados estratégicos para el desarrollo forestal [21] [22]. Bajo esta declaración existen 4.288.961 hectáreas, lo que representa aproximadamente un 24% de la superficie agropecuaria del país [23]. Esta delimitación se realiza a partir de la cartografía del sistema Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra (CONEAT), identificando como prioritarias para uso forestal aquellas tierras de baja productividad agrícola-ganadera debido a limitantes propias de los suelos como pendientes pronunciadas, pedregosidad o susceptibilidad a inundaciones. En este sentido, las unidades CONEAT clasificadas como zonas prioritarias incluyen las categorías 2, 5, 7, 07, 8, 9 y 09 [23].

Además del marco legal, otra ventaja que posee Uruguay es que se encuentra en una ubicación geográfica estratégica para la producción forestal ya que se posiciona en la misma latitud y zona climática que varios países con fuerte desarrollo de este sector, como ser el sur de Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y otros países con los que comparte las mismas condiciones de clima y suelo. Esto le proporciona al país un muy buen nivel en cuanto a competitividad a nivel

internacional, ya que las condiciones en las que se desarrollan las plantaciones forestales le aseguran una producción de madera de alta calidad tanto para la industria de celulosa como para la madera sólida [24].

Con el fin de optimizar la planificación y gestión del recurso forestal, la DGF estableció una división del territorio nacional en tres regiones forestales de acuerdo criterios de tipo de suelo, régimen climático y proximidad a los principales puntos de exportación de productos forestales [23] [25] [26], estableciendo tres regiones distintas:

- Región Centro-Norte que posee la mayor cantidad de área forestada, concentrando un 43% de las plantaciones principalmente en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo. En esta zona los suelos son mayormente arenosos y el clima se caracteriza por presentar mayores heladas en invierno y altas temperaturas en verano. Según un estudio realizado en 2016 en cuanto a productividad, es la región más diversa con aproximadamente 37%, 33% y 29% de productividad baja, media y muy alta (y alta), respectivamente. La principal especie plantada es *E. grandis*, seguida por algunas especies del género *Pinus*, siendo su destino principal la transformación mecánica, además es la región donde se encuentra la mayor parte de estas industrias que elaboran productos de madera sólida, como tablas y tableros.
- La Región Litoral también presenta heladas y los suelos predominantes van de franco-arenosos a arenosos. Los departamentos con mayor área forestada son Río Negro y Paysandú, con diferentes especies del género *Eucalyptus* y en menor medida *Pinus*, presentando ambos géneros menor rendimiento respecto a la Zona Centro-Norte, predominando suelos de productividad media de 86%.
- La Región Sureste concentra el área forestada mayormente en los departamentos de Lavalleja, Rocha y Florida. Posee gran influencia marítima, evitando temperaturas extremas y haciendo propicio el desarrollo de especies como *Eucalyptus globulus* Labill. y *E. dunnii* por su productividad y adaptación a distintos tipos de suelos. Es la región que posee suelos de prioridad forestal con productividad baja (93%), y el destino principal de estas plantaciones es para la industria de pulpa de celulosa.

El género *Eucalyptus* se destaca como uno de los más utilizados en plantaciones a nivel global y nacional debido a una serie de ventajas competitivas en comparación con otros géneros forestales. Entre sus atributos principales se encuentran su notable capacidad de adaptación a diversas condiciones edafoclimáticas, su rápido crecimiento y su versatilidad para la producción de madera destinada a múltiples aplicaciones. Además, la disponibilidad de plantines, el amplio conocimiento técnico en su manejo silvicultural, y la existencia de material genético mejorado incrementan su atractivo para uso en diversos propósitos productivos [9].

Según menciona la vigésima encuesta de viveros forestales realizada en Uruguay en el año 2021, se relevaron 24 viveros y el porcentaje de producción del género *Eucalyptus* es de 99,3% del total producido frente a un 0,7% del género *Pinus*. Entre las especies de *Eucalyptus* cultivadas, se encuentran *E. globulus ssp. bicostata* (Maiden, Blakely & Simmonds) J.B.Kirkp., *E. tereticornis* Sm, *E. globulus* Labill. *ssp. globulus*, *E. benthamii* Doncella y Cambage, *E. smithii* RTBaker, *E. grandis* y *E. dunnii* y otras especies híbridas. De éstas, *E. dunnii* es la de

mayor producción, con 52,8% del total relevado en los viveros y presenta una clara tendencia a aumentar en los próximos años, superando a *E. grandis* que representa un 31,8% del total. Además, ambas especies han aumentado su producción respecto al año 2019, con un incremento del 11% para *E. dunnii* y 9% *E. grandis* [27]. El predominio de la especie *E. grandis* no solo refleja las ventajas generales de la especie, sino también su capacidad particular para adaptarse a las condiciones locales y responder a las demandas productivas específicas del sector forestal. Estas características hacen de *E. grandis* una opción estratégica tanto en sistemas de producción tradicionales como en esquemas integrados, como los SSP, donde su rápido crecimiento y la calidad de su madera pueden contribuir significativamente a la multifuncionalidad de dichos sistemas.

2.1.1 *Eucalyptus grandis*

2.1.1.1 Características generales

El género *Eucalyptus* pertenece a MYRTACEAE nativa del continente australiano, y comprende alrededor de 950 especies que se desarrollan en la zona Oeste de Australia e islas vecinas. Tienen una distribución edafoclimática particular lo que les brinda la capacidad de adaptarse a condiciones distintas a las de su hábitat original, una habilidad derivada de su alta sensibilidad al entorno forestal [28].

En particular, el *E. grandis* es una especie de rápido crecimiento, que se adapta a distintos tipos de suelos y tiene muy buen desarrollo en elevaciones desde 0 a 1500 msnm. Produce madera de gran calidad, la cual es utilizada en la industria general de construcción, como leña para carbón vegetal, combustible o bien, en las grandes industrias como pulpa de celulosa o madera de aserrío y debobinado. Si bien es una de las especies forestales más exigentes dentro del género en cuanto a suelo y clima, miles de hectáreas han sido plantadas en los últimos años, pero su potencial productivo ha sido inferior a lo que esta especie puede ofrecer si se desarrolla en sitios adecuados [28].

2.1.1.2 Descripción botánica

En su lugar de origen se encuentran ejemplares en el bosque nativo con dimensiones entre 60 m de altura total y hasta 2 m de diámetro a la altura del pecho. Poseen tronco recto con buena forma y muy buen desrame natural, su follaje es de textura media a gruesa, formando copas anchas en lugares abiertos y comprimida cuando se desarrolla en plantaciones densas. Su corteza es caduca en fajas largas, lisa y la porción basal hasta los 3 m es persistente, fibrosa y escamosa, por debajo se puede ver un ritidoma gris verdoso a gris blanquecino [28] [29].

Los eucaliptos en general se distinguen por presentar dimorfismo foliar, es decir, presentan distintos tipos de hojas en la misma planta, siendo las juveniles opuestas y adultas alternas, con distinta morfología entre estadios [30]. Para *E. grandis* las primeras son ovales, pecioladas con base redondeada, verde oscuras en el haz y muy discoloras; las intermedias pasan a ser oval-lanceoladas con base cuneada y las adultas son lanceoladas, verde oscuras y discoloras, con nervaduras secundarias transversales [28].

Poseen flores blancas que se agrupan de 7 a 11 en inflorescencias simples axilares, con botones florales generalmente glaucos y opérculo cónico o rostrado (Fig. 1). Tiene dos épocas de floración, siendo la mayor a fines de verano y principio de otoño y una segunda de menor magnitud a comienzos de primavera. Es un árbol melífero de gran potencial.

Sus frutos son piriformes que crecen en grupos, con disco plano incluso y presenta de 4 a 6 valvas convexas con ápices convergentes [28].

Su madera es de color rojo claro y suave, presenta duramen rosado, moderadamente duro y durable en contacto con el suelo. Presenta densidad seca al aire de entre 640 a 690 kg/m³ [28].

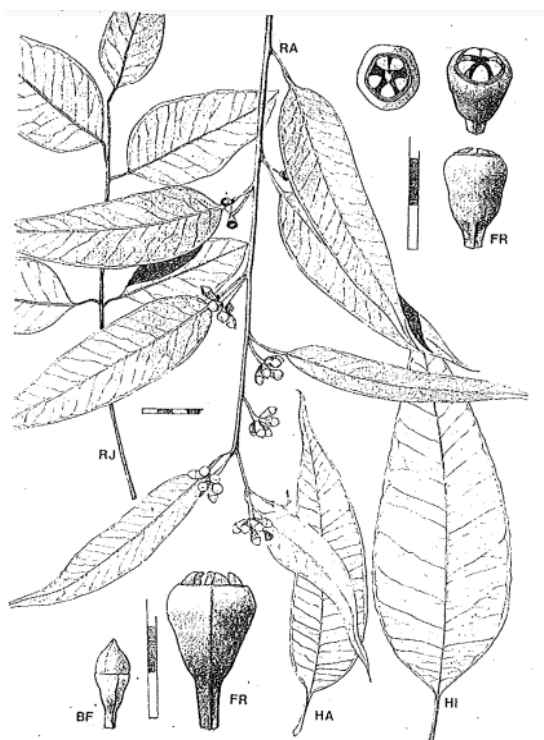


Fig. 1. Detalle de ramas, hojas y botones florales de *E. grandis* [28].

2.1.1.3 Origen y distribución

Es originario de la costa este de Australia, más específicamente en Nueva Gales del Sur y el sur costero de Queensland (Fig. 2), donde su distribución natural se localiza entre los 16° y 33° S de latitud. Se lo puede encontrar dentro de una faja de 100 km en el continente australiano, mayoritariamente por debajo de los 350 msnm o en zonas tropicales hasta los 900 msnm [29].

Es una de las especies exóticas más importantes en África y América, introducida a varios países a finales del siglo XIX. Es una de las especies más difundidas a nivel mundial, tanto por la extensión de sus plantaciones como por su excelente desarrollo y adaptación a distintos climas [29].

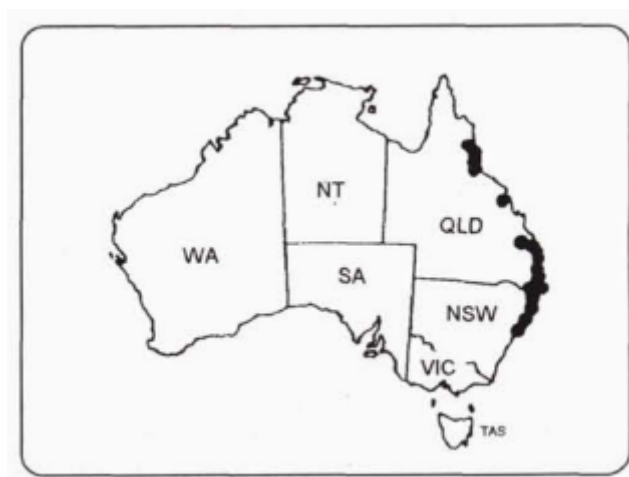


Fig. 2. Área geográfica de distribución natural de *E. grandis* en Australia [31].

2.1.1.4 Requerimientos ambientales

En su hábitat natural se desarrolla desde el sur en climas templados hasta los tropicales al norte, en temperaturas que tienen máximas entre 30-32°C y mínimas de hasta 3°C con pocas heladas. Las precipitaciones medias anuales registradas son de 1000 a 1800 mm, aunque según menciona National Academy of Sciences [29] se ha establecido exitosamente en zonas tropicales de América con 2500 mm.

Prefiere suelos húmedos, profundos, bien drenados, con buena capacidad de retención de agua y texturas limosas [28], aunque se adapta bien a suelos derivados de varios materiales. En su área de origen los suelos son infértiles y con bajo contenido de fósforo. Además, presenta sensibilidad a déficit de boro y nitrógeno [29].

2.1.1.5 Producción en Uruguay y adaptación a sistemas silvopastoriles

El cultivo de la especie *E. grandis* en Uruguay se extiende desde la década de 1960, luego de ser introducida de huertos semilleros de Sudáfrica [28]. Actualmente se encuentra distribuido en todo el territorio nacional, pasando de tener una superficie efectiva en 2017 de 235.620 ha a 256.079 ha en 2021, correspondientes a plantaciones mayor a tres años [19]. Por otro lado, representando un 36% del total de plantaciones menores a tres años, se registran unas 73.150 ha según la Cartografía Forestal 2021 [17].

Según la encuesta de viveros, en el año 2021 la producción de *E. grandis* correspondió a 35.274.431 plantines, los cuales se obtuvieron 67% mediante clones y el 23% restante por semillas, indicando que es una especie con buen enraizamiento, lo que se confirma por un estudio en el que se obtuvo porcentajes de enraizamiento que oscilan entre 70-90% dependiendo la técnica y genética utilizada [32]. Su buena capacidad de adaptación a diferentes sitios hace que esté presente en la mayoría de los departamentos, aunque su producción se concentra especialmente en Rivera abarcando 46.896 ha y Cerro Largo con 45.557 ha, seguido de regiones

del litoral con Río Negro y Paysandú [17]. Esta distribución responde a su destacada productividad en estas zonas, corroborada por investigaciones previas donde identifican su desempeño superior frente a otras especies forestales [33], [34].

En términos de productividad y teniendo en cuenta las zonas prioritarias mencionadas en la sección 2.1, existen estudios que demuestran que *E. grandis* es la especie que mejor se desarrolla en Zonas 7 y 9 (suelos profundos, arenosos y de baja productividad agrícola), no alcanzando esta productividad en sitios bajos de Zona 7, donde se presentan problemas de exceso de humedad sumado a mayor riesgo de heladas (siendo *E. benthamii* y *E. smithii* los más adaptados y productivos en estas condiciones), ni en Zona 2, donde *E. globulus* se presenta como el más productivo [34] [35]. Otros resultados presentados por estos autores destacan su mayor crecimiento y sobrevivencia, atribuyendo esta superioridad al mayor crecimiento individual que posee la especie, su bajo porcentaje de corteza que también aumenta la productividad relativa cuando se trata de obtener madera descortezada [33] [36]. En cuanto al incremento medio anual (IMA), cuando se desarrolla en sitios favorables, si bien no presenta un rápido crecimiento inicial y se comporta similar a otras especies en los primeros años, manifiesta una superioridad productiva a partir del año 6, donde se observa un crecimiento acelerado en comparación a las demás especies, alcanzando un IMA máximo entre los 10 y 13 años, con valores que oscilan entre 47,3 a 76 m³/ha/año, ubicando a *E. grandis* como el más productivo en sitios de Areniscas de Tacuarembó-Rivera [33].

El *E. grandis* se destaca como una opción prometedora para su integración en SSP debido a características específicas que lo diferencian de otras especies comúnmente utilizadas, por ejemplo, del género *Pinus*. Presenta un rápido crecimiento, uniformidad, rotaciones cortas y una gran variedad de productos forestales aprovechables en todo su ciclo, incluyendo madera para aserrío, postes para tendido eléctrico y biomasa para energía, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para mejorar la competitividad de empresas forestales o foresto-ganaderas [37]. Además, su copa de menor tamaño y densidad, junto con un buen desrame natural, favorecen una mayor transmisión de luz al sotobosque, permitiendo un mejor desarrollo de especies forrajeras [9]. A esto se suma la ausencia de efectos alelopáticos en *E. grandis*, lo que facilita su integración en SSP al promover la germinación y desarrollo de plantas forrajeras, mejorando la productividad del sistema [2]. También destaca por su buena forma de fuste y por las características tecnológicas de su madera, que la hacen especialmente adecuada para la producción de madera aserrada y debobinada [33].

2.2 Sistemas Silvopastoriles

Los SSP han acompañado al desarrollo del sector forestal de manera implícita teniendo registros desde 1900 [38] como montes de abrigo en establecimientos frutícolas y ganaderos. A partir de aquí, se comienzan a elaborar a nivel institucional distintas investigaciones, normativas, manuales técnicos que trataban la importancia de su implementación como bosques de protección para animales y cultivos, cortina rompevientos y otros aspectos que lo vinculan fuertemente al sector agropecuario. Sin embargo, es en la década de los 90 luego del impulso de la ley antes mencionada que comienzan a tratarse los SSP como una propuesta concreta en la DGF, como integración a los sistemas de producción explícitamente con el fin de diversificar la

actividad y producir ingresos. Se comienzan a crear distintos programas y proyectos a nivel nacional, como “*Agroforestry Systems: Alternative Productions for Uruguay*”, “*Estudios agroforestales para el Uruguay*”, que llevó a la creación de un “*Plan de Acción Agroforestal para Uruguay*” y también la asociación de distintos trabajos para crear el “*Banco de Datos Agroforestal*”. A nivel internacional, el fuerte desarrollo de las investigaciones llevó a Uruguay a integrar la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Sistemas Agroforestales [38] y a seguir investigando sobre esta nueva propuesta de modelo productivo.

En la actualidad, la forestación es uno de los sectores con mayor impacto en la economía uruguaya, siendo el segundo mayor exportador, después del sector ganadero [39], motivando aún más las inversiones en el área. Esto ha llevado a muchos productores ganaderos a planificar actividades para forestar sus predios, integrando ambas actividades para lograr un mejor aprovechamiento de las tierras, manteniendo su rubro principal, la ganadería, pero sin desaprovechar las oportunidades que les brinda el rubro forestal [40].

Si bien una de las limitantes para el desarrollo potencial de los SSP mencionada por distintos autores [11] [41] en sus publicaciones era la falta de información sobre el manejo, explotación e interacciones entre componentes, en los últimos años se ha venido realizando un esfuerzo conjunto entre varias instituciones nacionales e internacionales como el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - MGAP, el Ministerio de Ambiente, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, el Global Environmental Facility [42]; Facultad de Agronomía, Facultad de Veterinaria, Polo Agroforestal - CENUR noreste de la Universidad de la República; el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIA, el Instituto Plan Agropecuario, y la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA [43], que contribuyen a la profundización de conocimientos científicos y difusión de resultados para potenciar el desarrollo de estos sistemas. Entre los avances realizados por profesionales e investigadores en la temática, se destaca la creación de la primera plataforma de Investigación, Docencia y Extensión en SSP en Uruguay instalada en 2020, por un grupo interdisciplinario que tiene por objetivo estudiar de forma detallada los procesos de este tipo de sistemas desde la instalación hasta el turno final de cosecha de los árboles [44].

La definición de los SSP varía entre autores y organismos nacionales e internacionales, aunque existe consenso en que implican la combinación de especies leñosas (árboles o arbustos) con especies herbáceas (nativas o cultivadas) y/o animales en una misma unidad productiva [2] [45]. A nivel internacional, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura o FAO (por sus siglas en inglés *Food and Agriculture Organization*), (1984) ofrece una de las definiciones más completas, describiéndolos como un sistema de manejo sostenido de la tierra que incrementa su rendimiento mediante la producción combinada de cultivos, plantas forestales y animales, de forma simultánea o consecutiva, aplicando prácticas de manejo compatibles con la cultura local [46]. En Uruguay, una definición consensuada fue establecida en la consultoría de [45], donde se caracterizan como la integración deliberada y a largo plazo de árboles, ganado y pasturas, interactuando armónicamente para maximizar la producción de manera sostenible. Además, se destacan como plantaciones forestales no convencionales diseñadas de tal forma que contemplan bajas densidades iniciales, filas múltiples y callejones para facilitar la producción conjunta. Bajo esta modalidad y/o diseño, Uruguay cuenta con 6.392

hectáreas efectivas de SSP distribuidas en 39 predios, con un volumen total de 488.791,36 m³ [45].

Existen varios estudios donde los autores describen los beneficios que posee el establecimiento de SSP, entre ellos se encuentran: la protección por parte de los árboles frente a condiciones climáticas adversas tanto para los animales como para el forraje, beneficios económicos por la diversificación de la actividad productiva mediante el uso sustentable y eficiente de los recursos, generación de flujos de caja anuales que mejoran la renta en el tiempo, por generar ingresos a corto (por operaciones ganaderas), mediano (por venta de madera productos de raleo) y largo plazo (cosecha de árboles) que atenúan la inversión inicial, la reducción de los riesgos de incendios por el control en el crecimiento de las malezas que ejercen los animales, la protección y conservación de los suelos y cursos de agua, la mejora del valor nutricional del forraje y de la capacidad de retención de humedad del suelo, el aumento del contenido de materia orgánica, una mayor eficiencia en el reciclaje de nutrientes, entre otros aspectos que hacen del sistema un modelo atractivo de producción [9] [37] [47].

Por otro lado, se encuentran limitaciones tanto a nivel biológico como socioeconómico [2] [48]. En el contexto biológico se destaca la competencia entre los componentes por recursos como luz, agua y nutrientes, la intercepción de la precipitación por el follaje y su consecuente evaporación que disminuye el agua disponible para cultivos, los daños mecánicos que pueden causar los animales a los árboles y las tecnologías de cosecha a la vegetación asociada, la compactación del suelo por pisoteo de animales, el aumento de humedad y disminución de circulación de aire puede favorecer a organismos patógenos. En cuanto al entorno socioeconómico, se señala que la mecanización puede ser muy costosa o inviable lo que lleva a una mayor demanda en la mano de obra, el escaso conocimiento sobre la implementación y manejo, la falta de información y de personal capacitado para la gestión eficiente de estos sistemas, entre otros.

Con el fin de potenciar las ventajas sobre las desventajas que se pueden asociar a los SSP, es necesario entender a cada componente de este para poder realizar un manejo adecuado con el fin de potenciar su rendimiento, sin influir de manera negativa sobre alguno de ellos.

2.2.1 Componentes del sistema silvopastoril

2.2.1.1 Componente arbóreo

Los árboles como individuo biológico tienen un crecimiento y desarrollo muy bien estructurado que se divide en dos etapas. La primera corresponde a su crecimiento en longitud (crecimiento primario) tanto de tallo como de raíz, se debe a los meristemas primarios localizados en yemas apicales los cuales son tejidos vegetales que poseen una alta capacidad de división celular y diferenciación responsables del crecimiento en altura y la formación de nuevos órganos de la planta [49]. Generalmente, en leñosas el meristema apical de una sola rama se convierte en dominante, reprimiendo el desarrollo de los meristemas en otras ramas con el propósito de generar un tronco único [50]. Esta organización se debe a que los árboles priorizan su crecimiento en altura porque es lo que determinará su posición en la competencia por luz. A su vez, para crecer necesita la intercepción de luz por las hojas, por lo que también es la manera

rápida que tiene de crear nuevas ramas y agrandar el tamaño de la copa. Este crecimiento es independiente de la sombra o nivel de competencia que tenga, aunque si la cantidad de sombra a la que está expuesto es muy alta, termina produciendo una disminución del crecimiento a tal punto de provocar la muerte. Al invertir primero en el crecimiento en longitud, los árboles alcanzan su altura máxima a una edad relativamente temprana. La expresión máxima de altura está relacionada a la calidad de sitio (tipo de suelo y clima) lo que define la potencialidad de crecimiento de esa especie [51].

Una vez que ha garantizado la altura, si hay excedente lo invierte en la segunda etapa, llamada crecimiento secundario que permite el aumento en grosor en las plantas leñosas. Aquí se forman los llamados meristemas secundarios o laterales, los cuales aparecen más tardíamente en la planta y son responsables de la formación de madera y corteza, y por lo tanto del crecimiento en diámetro [49]. Este crecimiento sí está condicionado al nivel de competencia con la que se encuentre, por lo que sí hay mayor competencia el diámetro será pequeño, si la competencia es baja y dispone de más lugar para desarrollarse incrementará el mismo. Este crecimiento perdura más en el tiempo en comparación con el crecimiento en primario [51].

La copa es la parte del árbol que contiene las ramas y hojas donde se realiza la fotosíntesis, convierten la radiación solar en fotosintatos necesarios para el crecimiento, la reparación y el mantenimiento de los árboles [52]. La forma de la copa es una característica del árbol que nos dará información sobre su capacidad de crecimiento, vitalidad y madurez. Cuando el árbol está sano, desarrollará una copa adecuada en cada etapa de crecimiento. El tamaño está relacionado con la salud, el vigor y el desarrollo en diámetro, además se ve influenciada por las condiciones de competencia por luz en la que crece el individuo y está determinado por la cantidad de ramas vivas que posee. En este sentido, el tamaño disminuye cuando las ramas inferiores mueren por efecto del sombreado. Para mantener una rama viva, debe tener luz y el balance fotosíntesis/respiración debe ser positivo, de lo contrario la rama se seca y termina cayendo con el tiempo [51]. Varios autores han demostrado que los árboles a través de distintos procesos como la reducción de la demanda evaporativa, el aporte de agua profunda, la mejora en las condiciones edáficas y el aporte de nutrientes, pueden beneficiar al estrato herbáceo, manteniendo o incluso mejorando la productividad de éstas aún bajo la menor disponibilidad de luz por la influencia de las copas. Sin embargo, simultáneamente con los procesos anteriores, los árboles pueden competir con las especies del sotobosque por los diversos recursos [53].

2.2.1.2 Componente herbáceo

Uruguay se caracteriza por tener un ecosistema predominante de pradera que abarca el 87% de su territorio [54]. Dentro de este ecosistema, el campo natural tiene una importancia estratégica, ya que ocupa 11,6 millones de hectáreas, equivalentes al 71% de la superficie dedicada al pastoreo, por lo que este recurso constituye la base nutricional de la ganadería uruguaya [55]. El campo natural ha sido sometido a más de tres siglos de pastoreo por vacunos y ovinos y aunque estas actividades han impactado negativamente la biodiversidad y la composición de las praderas, el país aún conserva uno de los ecosistemas herbáceos templados más extensos y mejor preservados del continente [54].

Los pastizales uruguayos pertenecen al Bioma Pampa o Campos y forman parte de los "Pastizales del Río de la Plata", una de las eco-regiones de pasturas naturales más extensas e importantes del mundo. Estos ecosistemas están compuestos por gramíneas templadas, que crecen principalmente en las estaciones frías, y gramíneas tropicales y subtropicales, adaptadas a estaciones cálidas [56]. En particular, en Uruguay existen aproximadamente 400 especies de gramíneas, en su mayoría forrajeras de ciclo estival e invernal y más de 100 especies de leguminosas, organizadas en distintas comunidades vegetales. Esta diversidad asegura una producción forrajera casi constante durante el año, lo que otorga estabilidad al sistema productivo [56] [57]. Entre las principales especies encontradas en el campo natural se destacan *Andropogon lateralis* Nees, *Paspalum notatum* Flügge, *Axonopus argentinus* Parodi y *Piptochaetium montevidense* (Spreng.) Parodi [58].

Desde un punto de vista geomorfológico, la presencia de pastizales naturales del territorio uruguayo se divide en cuatro regiones principales: Cuesta Basáltica, Región Centro-Sur, Sierras del Este y Cuenca Sedimentaria del Noreste [59]. Estas áreas presentan restricciones ambientales y geográficas que han limitado la expansión de la agricultura y la forestación, contribuyendo a la conservación de estas praderas [60].

La importancia del estrato herbáceo radica en las diversas funciones que cumple, como la protección del suelo de la erosión mediante su cobertura natural, la preservación y limpieza de los cursos de agua, reducción del escurrimiento superficial por efecto de la lluvia y su contribución al secuestro de carbono, entre otros factores que resaltan el valor de su conservación [61].

Con relación a las especies presentes en el país, varios estudios mencionan el fuerte predominio de especies estivales (C4) [62] [63], cuya mayor producción de forraje ocurre en primavera y verano, mientras que las especies invernales (C3) son menos frecuentes, con hierbas gruesas predominantes y escasa presencia de especies finas [64]. La frecuencia de leguminosas nativas es baja en todas las comunidades vegetales.

La producción anual de forraje está afectada por los diferentes tipos de suelos ya que influyen en la composición, densidad y productividad de estas comunidades, determinando rendimientos que oscilan entre 2500 y más de 5000 kg de MS/ha (materia seca por hectárea) según la fertilidad del suelo. Los suelos más livianos (arenosos) tienden a albergar especies de menor calidad y palatabilidad (medida de qué tan "rico" o agradable al paladar resulta un forraje para el animal), mientras que los suelos fértiles presentan pastos de mayor calidad [65][66].

En cuanto a la calidad del forraje, el contenido de proteína cruda (PC) en las pasturas nativas varía entre 6% y 15%, alcanzando máximos en primavera, y es más alto en gramíneas C3 [65]. La degradación de estas pasturas se asocia con una carga animal elevada y el predominio de ovinos sobre bovinos, en los predios donde esa relación se da, se produce una disminución del 12% en la producción anual de forraje debido a la pérdida de especies y cambios en la composición botánica, favoreciendo especies adaptadas al sobrepastoreo [64][67].

Entre los beneficios de integrar el componente arbóreo sobre el estrato herbáceo, se puede mencionar la mejora en la producción y calidad del forraje. Algunos estudios señalan que la pastura que se desarrolla bajo el monte presenta un incremento en la composición de proteína y una disminución en el contenido de fibra [4], lo cual podría representar un aspecto favorable para la producción animal. Por otro lado, un nivel moderado de sombra (entre 40-50% de luz solar) puede aumentar la eficiencia de uso de la radiación y favorecer el crecimiento de las pasturas, especialmente bajo condiciones de limitaciones hídricas [68] [69]. Asimismo, la sombra producida por los árboles puede modificar favorablemente la composición florística de las pasturas, reduciendo la presencia de especies menos palatables y promoviendo especies de mayor valor forrajero como *Axonopus spp.* [70].

Entre las especies forrajeras con potencial para su incorporación en SSP se destacan las gramíneas como *Paspalum regnellii* Mez, *P. dilatatum* Poir y *P. notatum*, así como la leguminosa *Arachis pintoi* Krapov. & W.C. Greg., las cuales han mostrado un buen desempeño bajo condiciones de sombra moderada, evidenciando aumentos en el índice de área foliar, en la nutrición nitrogenada y en el rendimiento de biomasa [68]. Asimismo, un estudio realizado en Tacuarembó identificó a *Bromus catharticus* Vahl. y *Cynodon dactylon* (L.) Pers. como especies con buena adaptación al sombreado [71], lo que las convierte también en alternativas prometedoras para su utilización en SSP.

2.2.1.3 Componente animal

Uruguay posee 16,4 millones de hectáreas aptas para uso agropecuario, lo que equivale a más del 90% del territorio, con la ganadería ocupando un rol predominante [72]. Este sector utiliza 12 millones de hectáreas [73] y constituye un pilar de la economía nacional, representando el 8% del PIB en el 2023 [74]. Además, el país exporta productos ganaderos a cerca de 100 mercados internacionales, con una destacada presencia en regiones como Asia, Europa y América del Norte. En 2023, la ganadería uruguaya alcanzó cifras de 11,57 millones de cabezas y una faena de 2,3 millones de animales, generando ingresos de USD 3958 millones en exportaciones, lo que mantiene al sector como principal exportador, subrayando su importancia económica y productiva [74].

Uruguay también se posiciona como líder en la adopción de prácticas agropecuarias sostenibles, destacándose la certificación de carne carbono neutral y el diseño de estrategias de ganadería climáticamente inteligente, en línea con el objetivo de alcanzar emisiones netas de GEI – Gases de Efecto Invernadero iguales a cero para 2050. Programas como Ganadería y Clima, respaldados por la FAO y el GEF - Global Environment Facility, reflejan el compromiso del país en promover un equilibrio entre la productividad ganadera y la reducción del impacto ambiental [75] [76].

El bienestar animal es otro aspecto clave. Certificar sistemas que garanticen condiciones óptimas para los animales no solo responde a las crecientes demandas éticas de los consumidores, sino que también abre oportunidades en mercados especializados [77]. Además, se destaca el diseño de estrategias de marketing basadas en sistemas de producción sostenibles y

éticos que puedan incrementar la confianza de los consumidores y generar lealtad hacia los productos derivados [78].

Los beneficios ambientales de integrar el componente animal en SSP también son notables ya que mejoran la eficiencia en el uso de los recursos naturales al reciclar nutrientes y mitigar los impactos ambientales asociados a la ganadería convencional. El desarrollo de sistemas “limpios, verdes y éticos” constituye un camino ineludible hacia una producción ganadera sostenible que responda a las políticas globales y las preferencias de los consumidores [78] [79].

2.2.2 Interacción Árbol-Pasto-Ganado

2.2.2.1 Efecto del árbol en el animal

Los sistemas de producción ganadera, particularmente en la cría de bovinos, son esenciales para la economía, y su desempeño depende en gran medida de las condiciones climáticas del entorno, como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y los vientos. Estos factores pueden afectar negativamente la productividad de los animales, especialmente cuando no están adaptados a condiciones climáticas extremas [80]. Los bovinos, como animales homeotermos, poseen un rango de temperatura ambiental conocido como zona de confort, dentro del cual pueden vivir, producir y reproducirse de manera óptima. Este rango varía según la raza del animal: las razas *Bos taurus taurus* L. adaptado a zonas templadas presentan una zona de confort entre 5 y 20°C, mientras que las razas *Bos taurus indicus* L. de climas más cálidos y tropicales tienen un rango de 10 a 27°C [81] [82].

Cuando las temperaturas superan estos rangos, los bovinos comienzan a emplear mecanismos para disipar el calor corporal, tales como conducción, convección, radiación y evaporación. Si estos mecanismos no son suficientes, el animal experimenta cambios fisiológicos, como la disminución del consumo de alimento y alteraciones metabólicas, y en casos extremos, puede llegar a la muerte debido a la incapacidad de regular la temperatura corporal [83].

La temperatura, junto con la humedad relativa y la radiación solar, es el principal factor asociado al estrés calórico. Este efecto se acentúa en agroecosistemas húmedos, por lo que es fundamental monitorear estas variables para identificar las épocas del año en que los animales están más expuestos a condiciones extremas [80]. En este contexto, el uso de árboles en SSP juega un papel crucial en la mitigación del estrés calórico, ya que sus copas crean microclimas que ayudan a reducir la temperatura corporal del ganado. Un estudio reportó reducciones de temperatura de entre 2 °C y 9 °C en comparación con pastizales a campo abierto [84]. Además, estos sistemas proporcionan otros beneficios como la mejora de la fertilidad del suelo, la regulación del balance hídrico y la captura de CO² atmosférico, tanto en los árboles como en el suelo, aumentando sobre todo el stock de carbono de este último [80].

Los SSP, mediante la generación de sombra, tienen efectos positivos sobre el bienestar animal. Algunos autores destacan que la sombra favorece el consumo voluntario de forraje, contribuyendo a que se realice de forma más constante, incrementando el tiempo de rumia y pastoreo, lo que a su vez mejora la eficiencia de conversión alimentaria y, por ende, la producción de carne y/o leche [58] [85]. Resultados encontrados expresan que los animales bajo SSP exploran un área mayor durante el día, pasan más tiempo pastando y menos tiempo

descansando que las vacas a pleno sol, ya que dedican menos tiempo a caminar durante las horas diurnas [58].

Este efecto es particularmente beneficioso para las razas *Bos taurus taurus*, que son menos tolerantes al calor y las condiciones tropicales. En estudios realizados en el sur de Misiones - Argentina, se observó que el pastoreo de vacunos bajo el dosel de *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R. Br. permite una carga animal de al menos el doble en comparación con el pastizal abierto, sin necesidad de suplementación en la dieta. Además, los animales mostraron un aumento en la ganancia de peso de aproximadamente 0,4-0,5 kg por animal por día, durante el año [86] [87]. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en un estudio realizado en Tacuarembó, donde se registraron valores mayores de peso vivo en vacas pastoreando bajo SSP que a pleno sol, al igual que en los terneros para los cuales se observó una ganancia diaria promedio de entre 0,843-1,004 kg/día bajo SSP, en comparación con 0,674-0,803 kg/día pastoreando a pleno sol, resultando en un mayor peso al destete de terneros en SSP [58]. Lo expresado anteriormente sugiere que estos sistemas pueden mejorar notablemente la productividad ganadera, permitiendo incluso el cambio de una zona de cría a una zona de engorde.

Las condiciones que brindan los SSP no solo favorecen el bienestar animal, sino que también mejoran la eficiencia reproductiva, aumentando la calidad seminal, la tasa de concepción y reduciendo las pérdidas embrionarias [85].

Finalmente se puede concluir que las investigaciones realizadas [58] [85] [87] demuestran que la integración de árboles en SSP aporta beneficios clave para la producción ganadera, especialmente al reducir el estrés calórico. Esto se traduce en un mayor consumo de alimento, una mejor conversión alimenticia y una mayor salud reproductiva. Además, estos sistemas contribuyen a la sostenibilidad y eficiencia de los agroecosistemas ganaderos.

2.2.2.2 Efecto de la sombra de árboles sobre el forraje

En los SSP, las interacciones entre los recursos forrajeros y los árboles pueden ser tanto de interferencia como de facilitación y están fuertemente influenciadas por recursos clave como la luz, la humedad y los nutrientes [10]. La luz, en particular, afecta el crecimiento del estrato herbáceo, mientras que la humedad y los nutrientes condicionan el comportamiento del componente arbóreo. Durante el establecimiento de los árboles, la competencia por estos recursos puede incrementar la mortalidad de los árboles jóvenes y, con el tiempo, limitar su crecimiento [88].

La competencia, definida como una interacción entre individuos por recursos limitados [89], es un proceso fundamental en la dinámica de estos sistemas. La competencia por la luz puede tener efectos sobre el desarrollo de ambos componentes, en tanto que la sombra creada por los árboles en desarrollo modifica el microclima generado en los callejones afectando la cantidad y calidad del forraje, el microclima creado entre los árboles reduce la velocidad del viento, la radiación solar, modifica la relación luz roja/luz roja lejana, la temperatura se vuelve más moderada, se reduce la tasa de evapotranspiración y aumenta los niveles de humedad [90].

Estos factores ambientales que son modificados por el sombreado de las copas tienen un efecto sobre la calidad del forraje ya que la digestibilidad de la materia seca y el contenido de

nutrientes están determinados por la anatomía, morfología y composición química de las plantas [90].

Durante la fase de desarrollo vegetativo de los forrajes, la distribución de nitrógeno en las hojas se ajusta al gradiente de luz disponible, lo que optimiza la fotosíntesis en condiciones de alta irradiancia. Este patrón de partición de nitrógeno es beneficioso, ya que la ganancia de carbono por unidad de nitrógeno invertido es mayor a medida que aumenta la disponibilidad de luz [91]. Sin embargo, el sombreado también tiene efectos adversos, especialmente en las gramíneas, que responden elongando los entrenudos y reduciendo el crecimiento de las raíces. Este fenómeno puede hacer que los tallos, que contienen mayor proporción de pared celular en comparación con las hojas, sean menos digestibles, afectando la calidad del forraje [92].

Contrariamente a lo mencionado, se ha observado un aspecto adicional que es el aumento del área foliar específica (AFE) bajo condiciones de sombreado, lo cual se asocia con una disminución en el contenido hídrico y la densidad de los tejidos, mientras que se incrementa el grosor de las láminas foliares y del mesófilo. Este cambio puede mejorar la digestibilidad del mesófilo, que es un tejido altamente nutritivo, mientras que los tejidos fibrosos (pared celular) se descomponen más lentamente, lo que sugiere que el sombreado puede mejorar la calidad del forraje en ciertas condiciones [93]. En este sentido, se constató que el contenido de fibras fue de 7,8 % más bajo en sistemas bajo árboles en comparación con las que se desarrollan a pleno sol [58] [90]. Además, estas investigaciones afirman que hay un aumento en el contenido de proteína cruda bajo sombra, con valores registrados desde 29,6% a 45% más altos bajo SSP en comparación con las producidas a campo abierto. Esta tendencia fue más predominante en especies de gramíneas que en leguminosas, las cuales no se encontró un aumento significativo.

Según menciona [94], las especies forrajeras como *Dactylis glomerata* L. (pasto ovillo), *Bromus catharticus* Vahl. (cebadilla criolla) y *Trifolium pratense* L. (trébol rojo), son ejemplos de plantas que pueden adaptarse a la reducción de luz en SSP y continuar su desarrollo bajo condiciones de sombra moderada.

El manejo adecuado de la densidad de los árboles y el diseño del sistema es fundamental para optimizar el ingreso de luz y lograr una producción complementaria tanto en el crecimiento arbóreo como la productividad forrajera, garantizando un equilibrio que beneficie a los componentes del sistema [11].

2.3 Efecto de la densidad arbórea en los parámetros dendrométricos y dasométricos

2.3.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes

La densidad forestal, considerada como la cantidad de árboles por unidad de superficie, es uno de los factores más importantes a considerar cuando se va a establecer una plantación, junto con la calidad de sitio y la edad de corte, y su elección depende del objetivo de producción [95] [96]. Las densidades de plantación más frecuentes en Uruguay oscilan entre 450 plantas por hectárea, típicas de sistemas silvopastoriles y 1.600 plantas por hectárea en sistemas forestales puros en

sitios de alta productividad. En ciertas áreas, estas densidades pueden ser aún mayores [97]. Para especies de *Eucalyptus*, la densidad de plantación predominante es de 1.111 árboles/ha, correspondiente a un espaciamiento de 3x3 m [98].

En cuanto al objetivo de plantación, en la producción de pasta de celulosa se utilizan densidades altas y sin tratamientos silviculturales intermedios, debido a que el interés es una mayor producción de volumen total de madera por ha, estableciendo turnos de aproximadamente 10 años, donde se realiza una sola cosecha [99] [100]. Por otro lado, cuando las plantaciones son orientadas a la producción de madera sólida (cuyos productos son destinados a la industria del aserrío y debobinado) se busca generar fustes de mayores dimensiones, por lo que se instalan inicialmente menores densidades de plantación y se realizan tratamientos silviculturales intermedios [101] durante el ciclo del cultivo con el fin de optimizar el crecimiento de los mejores árboles y concentrarlo en un menor número de individuos. Los tratamientos intermedios más comunes son la poda y el raleo [102]. En estos casos, el turno de corta se extiende de 15 a 20 años, pudiendo ser mayor dependiendo de la especie, con cosechas parciales realizadas durante este período [99].

En cuanto a la silvicultura y al manejo de las plantaciones, uno de los factores principales en la toma de decisiones es el análisis del espaciamiento óptimo al establecer una plantación, que se puede lograr a través del estudio del crecimiento de los individuos en diferentes arreglos. Esto es porque la densidad a establecer influye directamente en la tasa de crecimiento, la calidad de la madera, la edad de corte y, por lo tanto, en los aspectos económicos de la inversión inicial. A pesar de que este sector presenta ciclos de producción largos y dinámicos, las variaciones en las densidades y por ende en los espaciamientos de plantación y su posterior manejo, tienen que ser coherentes con los objetivos establecidos inicialmente para este [103].

Según cita [104], un pequeño aumento en la densidad de plantación puede reducir considerablemente el DAP, efecto que se acentúa con la edad del árbol. Además, existe una tendencia significativa al incremento del DAP con una mayor intensidad de raleo, ya que la apertura del dosel favorece el acceso a recursos. En estudios sobre material clonal que evalúan distintos diseños y espaciamientos, los autores sostienen que un mayor espaciamiento proporciona más recursos por árbol, lo que resulta en un mayor DAP en los clones con mayor espacio vital disponible para su crecimiento [104]. En general, la literatura respalda esta relación, señalando que el crecimiento en diámetro depende en gran medida del espaciamiento [6] [37], dado que la competencia por luz, humedad y nutrientes influye directamente en el desarrollo del componente arbóreo [105] [106].

Según [9] existe una tendencia a la disminución del volumen de madera producido por unidad de área en función de la reducción del número de árboles, sin embargo, el volumen puede ser el mismo ya que en espaciamientos más grandes el crecimiento en diámetro es mayor que en poblaciones más densas. Además de la dimensión y densidad de la madera, otros factores influenciados por el espaciamiento entre árboles son la presencia de nudos, la formación de madera de reacción y la conicidad del fuste, los cuales tendrán repercusiones en el producto final generando menor o mayor valor a la madera [9].

En cuanto a la altura total, investigaciones demuestran que existe una tendencia a un mayor crecimiento con la reducción del espaciamiento entre árboles, justificando este comportamiento por la competencia por luz que presentan las plantas [103]. En esta reducción del espacio vital que poseen los árboles para crecer, la competencia por luz se intensifica, y si bien estimula el crecimiento en altura, ciertas especies como *E. grandis* que son altamente dependientes de la luz para su desarrollo pueden ser perjudicadas, llevando a reducir su potencial productivo. Aun así, estudios demuestran que el mayor crecimiento inicial y la altura total de los árboles es mayor en densidades más altas, siendo esta variable dependiente de los arreglos con menor espaciamiento, concordando con las afirmaciones de [106] [107].

Otra variable influenciada por el espaciamiento es el área transversal (g). En un estudio [106] se encontró que el área transversal individual es mayor en espaciamientos amplios, siguiendo la misma tendencia que el crecimiento en diámetro. Sin embargo, el área basal (G) por hectárea, resultado del área transversal multiplicada por el número de individuos por hectárea, o sea la densidad, disminuye con el aumento del espaciamiento. Esto concuerda con los hallazgos de [108], quien señala que el área basal aumenta con a mayor densidad de plantación y que las diferencias se acentúan con la edad, aunque en densidades muy altas (más de 2000 plantas/ha), su crecimiento se desacelera después de los 6 años. Estos resultados son fortalecidos en otros estudios [109] [110], donde los autores indican que los espaciamientos más reducidos generan una mayor producción por unidad de área, reflejada en valores más altos de área basal/ha debido a la mayor cantidad de árboles. En este sentido, los factores que favorecen el crecimiento en diámetro también impulsan el incremento del área transversal, pero el aumento del área basal dependerá tanto del crecimiento individual como del número de árboles en la plantación.

Cuando una plantación forestal tiene por objetivo la producción de madera, la característica más importante para evaluar la productividad de ésta es el volumen. Si bien éste varía en función de las características del suelo y las condiciones climáticas del sitio de plantación [98], el volumen también está influenciado naturalmente por el número de árboles por hectárea. Varios autores reportan influencias de la densidad de plantación sobre el volumen total/ha y en todos los casos se encuentra una tendencia al decrecimiento del volumen total con el aumento del espaciamiento, lo que sugiere que la producción está regida por la cantidad de árboles por hectárea y no por el estado de competencia [104], para el caso de las plantaciones comerciales del tipo de sistemas existentes en la región.

Según la literatura, la producción en volumen de madera siempre disminuye al aumentar el espaciamiento inicial, aunque esta diferencia de producción se vuelve menor a medida que aumenta la edad de la plantación. Esto ocurre porque en poblaciones más densas, la tasa de crecimiento comienza a estancarse a edades más tempranas, lo que conduce a obtener individuos con dimensiones menores y una edad de rotación más corta. Sin embargo, en plantaciones con espaciamientos mayores, la producción volumétrica esperada al finalizar una rotación es similar a la obtenida en espaciamientos más reducidos [107].

En consecuencia, la disminución de la densidad de plantación disminuye la competencia intraindividual y hace disponible por más tiempo los factores de producción favorables para el

establecimiento y crecimiento de los árboles [111], obteniendo mayores medidas de DAP y volumen por planta, pero menor volumen por hectárea.

2.3.2 Parámetros dendrométricos de copa

La caracterización morfológica de árboles individuales y rodales forestales se ha centrado tradicionalmente en la medición de diámetros, alturas y algún otro aspecto relacionado a la calidad del fuste [112]. Esta descripción puede enriquecerse a través de la medición de parámetros de copa, que se presenta como una herramienta valiosa para la toma de decisiones silviculturales (realización de podas, raleos, evaluación de calidad de plantaciones) y para investigaciones relacionadas con el crecimiento y rendimiento forestal. Si bien la medición de parámetros de copa es menos común debido a los requerimientos de tiempo y falta de protocolos estandarizados sobre cómo realizar mediciones y emplear la información, diversos estudios [113] han demostrado el potencial para caracterizar plantaciones utilizando la morfometría de copa como indicador de la vitalidad de la población.

Por otra parte, la productividad de la pastura en los SSP está influenciada por la interacción entre factores ambientales y de manejo, que inciden sobre la fisiología y morfología de las especies forrajeras [114]-[116]. El dosel arbóreo, al modificar las variables microclimáticas como la intensidad y la calidad de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la temperatura, disponibilidad de agua y los procesos edáficos como la mineralización de nitrógeno [117], ejerce un control determinante sobre la producción primaria de las especies del sotobosque. Este enfoque ha sido utilizado para predecir la productividad forrajera en estos sistemas [118], estableciendo relaciones simples entre la producción y variables estructurales del componente arbóreo, como el área basal [119], el volumen de copa [120] o la longitud de copa verde [119]. En este sentido, la morfometría del árbol, a través del estudio de las variables de copa, se presenta como una herramienta para comprender las relaciones interdimensionales de los árboles, como el espacio vertical ocupado, la intensidad de competencia, la vitalidad y la productividad de cada árbol en la plantación, aspectos fundamentales para interpretar la estructura y el funcionamiento de los agroecosistemas forestales [121].

La copa es uno de los componentes que influyen sobre la producción primaria de la plantación, siendo el órgano encargado de sostener el tejido fotosintético de los árboles y producir energía para el proceso vital de crecimiento [122]. Sus dimensiones reflejan la vitalidad del individuo, de modo que cuando son densas y altas se asocian con un crecimiento vigoroso y cuando las copas presentan poco desarrollo y son poco densas manifiestan condiciones desfavorables de crecimiento debido a factores de competencia, estrés por humedad, influencia de la defoliación por insectos, enfermedades de las hojas, entre otros [123]. En este sentido, el diámetro de la copa (dc) refleja la dimensión de la estructura encargada de realizar fotosíntesis y está directamente relacionada con la capacidad de crecimiento del individuo, siendo una variable básica y muy utilizada para inferir otras características de los árboles, la misma se corresponde con la distancia entre las líneas de proyección de los dos puntos más externos de la copa [121].

La altura de inserción de la copa es medida desde la primera rama viva y constituye un parámetro fundamental en el análisis morfométrico de árboles, ya que permite estimar otros atributos de la copa. Según la literatura, tiene una buena correlación con la altura total del árbol

[124], y está influenciada por factores como la edad de la plantación y las prácticas silviculturales, especialmente la poda. La tendencia natural es que la altura de inserción de la primera rama viva se desplace hacia arriba a medida que la plantación envejece, debido a la competencia por luz, y artificialmente puede ser modificada por la poda. Por lo citado anteriormente, el conocimiento de la relación entre la altura de inserción de la copa viva y la altura total del árbol es crucial para optimizar la altura de poda, mejorar la calidad de la madera y disminuir la competencia [124].

Otra variable utilizada en la descripción morfológica de un árbol es la longitud de copa viva (lcv), que se relaciona con la intercepción de la radiación en el rodal y la fotosíntesis neta [125], pero que también tiene influencia sobre la producción de biomasa forrajera [126]. Sin embargo, el análisis de esta variable presenta algunas restricciones ya que no refleja de forma adecuada la ocupación del sitio ni la influencia en el crecimiento, dado que la eliminación de una proporción de ramas basales por podas no causa el mismo efecto sobre el crecimiento que eliminar la misma proporción de ramas por otros tratamientos silvícolas en donde se elimina la biomasa aérea de un árbol por completo [127]. Aun así, algunos autores utilizan la longitud de copa verde para vincular efectos de tratamientos silvícolas con los incrementos en área basal y la producción forrajera bajo el dosel arbóreo [120].

La proporción o porcentaje de copa (PC) es una variable menos conocida y estudiada, se corresponde con la relación entre la longitud de copa viva y la altura total del árbol. Ésta junto con otras características de la copa es también un indicador de vitalidad de los individuos y cuanto mayor es este porcentaje, mayor vitalidad y productividad tendrá el árbol. Además, la literatura menciona que es una variable que puede indicar el grado de competencia en el que se desarrollan los árboles y por lo tanto puede ser utilizada en modelos de competencia [121].

Otra relación morfométrica de la copa es la relación entre el dc y el DAP. Para cada especie estas variables están fuertemente correlacionadas, al punto de que una variable se podría predecir a partir de la otra [122]. Conforme lo citan algunos autores, esta relación es denominada índice de espacio vital e indica cuántas veces el diámetro de la copa es mayor que el diámetro del árbol, asimismo, mencionan que ha sido utilizado para deducir el número máximo de árboles que podrían ocupar una hectárea, por lo que puede ser utilizado como un indicador de raleo o para determinar, a cualquier edad, qué espacio debería ser liberado alrededor de un individuo para que éste crezca sin competencia [121] [124].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de sitio de estudio

El trabajo se desarrolló en la primera Plataforma de Investigación, Docencia y Extensión en Sistemas Silvopastoriles del Uruguay, coordinada por el Polo Agroforestal, CENUR Noreste, Udelar (detalles de la plataforma ver [44]). Se encuentra en el predio denominado “Mi Capricho” y constituye una plataforma experimental interdisciplinaria de largo plazo, que se encuentra ubicada en el paraje Puntas del Sauce en el departamento de Cerro Largo, aproximadamente a 28 kilómetros de la ciudad de Melo, por ruta nacional N°8 hacia el norte y camino vecinal del paraje hacia el oeste (32° 11' 04" S–54° 13' 51" O) (Fig. 3).

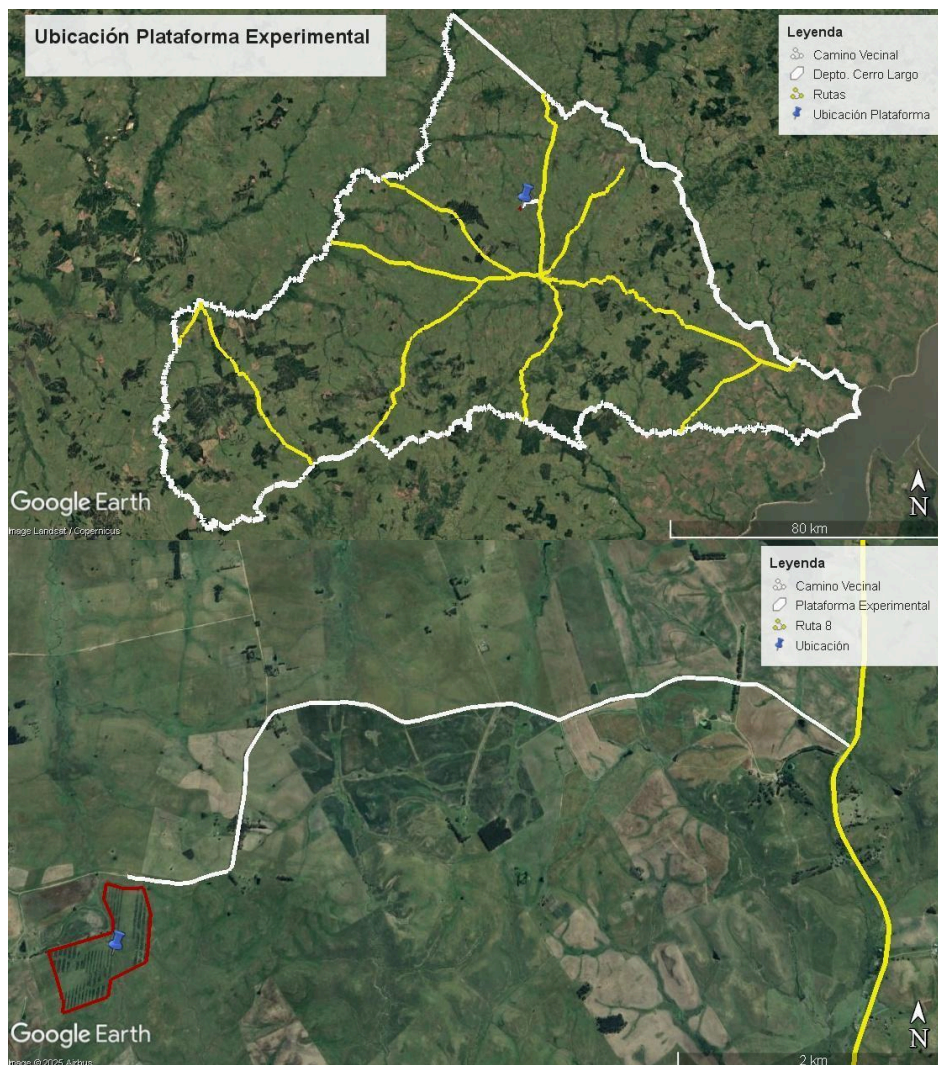


Fig. 3. Ubicación de Plataforma Experimental “Mi Capricho”. Elaboración propia

La zona se caracteriza por presentar un clima subtropical húmedo, con temperaturas que oscilan desde -3°C en el mes más frío y superan los 22°C en verano, presentando un promedio

anual de 18 °C. La precipitación es relativamente uniforme a lo largo del año, con un promedio anual de 1200 mm [44] [46]. Según la Clasificación de Suelos del Uruguay [128] [133] (MGAP, 1976), los suelos del área de estudio pertenecen a los grupos CONEAT 6 1/3 y 8.5 (Fig. 4). Estos se caracterizan por poseer relieves constituidos por colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes, con pendientes entre 5 y 14%. Para el primer grupo, los suelos dominantes son Litosoles Subéutricos Melánicos de fertilidad media y bien drenados, al cual se asocian Brunosoles Éutricos Lúvicos que ocupan las partes bajas de laderas y con alta fertilidad. El material geológico del segundo grupo corresponde a areniscas rojas de la formación Yaguarí o areniscas redepositadas sobre estas, los suelos dominantes son Luvisoles Melánicos Albicos (Praderas Arenosas), moderadamente profundos, imperfectamente drenados y fertilidad muy baja, a los que se asocian Luvisoles Úmbricos Albicos, muy profundos y fertilidad extremadamente baja. Ambos grupos poseen vegetación de pradera estival y uso mayoritariamente pastoril, con un Índice de Productividad 83 y 105, respectivamente [129].



Fig. 4. Tipos de suelos, grupos CONEAT. Elaboración propia

3.2 Descripción de diseño experimental

La plataforma experimental abarca una superficie total de 30,24 hectáreas y se constituye como una plantación silvopastoril de *E. grandis* de origen seminal instalada en primavera en el año 2020. El objetivo del componente arbóreo es la producción de madera para transformación mecánica con un turno final de 15 años. En cuanto al diseño experimental, se incluyen tres tratamientos arreglados en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 3 repeticiones (B1, B2, B3). En este trabajo se consideraron dos tratamientos. El tratamiento 1 consta de filas dobles (2F) de árboles con 5 m entre árboles y entre filas y con 20 m de callejón, o sea de

distancias entre las 2F, con una densidad inicial de 160 árboles/ha, ocupando 9,92 hectáreas totales y el tratamiento 2 consta de filas cuádruples (4F) con 5 m entre árboles y entre filas y 20 m de callejón, con una densidad inicial de 229 árboles/ha, distribuidas en 11,25 hectáreas. Además, existe un tratamiento control, sin árboles, con el fin de poder evaluar otros parámetros de la plataforma. En todos los casos la orientación de las filas es norte-sur, y la base es de campo natural. Los bloques fueron construidos en función de la similaridad de la topografía y la condición general del sitio entre unidades experimentales (Fig. 5).



Fig. 5. Bloques y tratamientos

3.3 Datos de inventarios

Para este estudio se utilizaron datos de dos inventarios realizados mediante censo a los 2,5 y 3,6 años. El censo de los 2,5 años se realizó previo a la elaboración de este estudio, pero sus datos aún no habían sido procesados. Se efectuó en otoño de 2023 donde se midieron variables dendrométricas de fuste como la altura total (ht) y diámetro a la altura del pecho (DAP – 1,30 m del suelo), con el empleo de una pértiga telescópica y una cinta diamétrica, respectivamente. Se midieron y registraron 3.258 árboles en todo el ensayo. El censo a los 3,6 años se realizó en otoño de 2024, donde se midió ht utilizando un hipsómetro Vertex IV y el DAP con cinta diamétrica. En este caso se midieron 2.981 individuos, los 277 faltantes fueron excluidos de las mediciones ya que se encontraban quebrados, caídos, secos, faltantes o muertos. Con los datos obtenidos a campo se realizaron los cálculos de área transversal (g) en m^2 (Ec. 1), el cual es el área de una sección transversal del fuste a 1,30 cm de altura sobre el suelo [130] [135] (Prodan, 1997) y volumen individual aparente (v) en m^3 (Ec. 2) que representa el volumen de un cilindro con diámetro igual al DAP. Además, para realizar la comparación entre tratamientos, a estas últimas dos variables se las expandió a la hectárea como área basal (m^2/ha) y volumen aparente (m^3/ha) (AB y V) como se muestra en las ecuaciones 3 y 4. Para realizar los cálculos de estas últimas dos variables se tuvo en cuenta el número de árboles por hectárea de cada tratamiento y para analizar los resultados se discutió en base al total de hectáreas de cada tratamiento.

$$\text{Área transversal} \quad g = \left(\frac{\pi}{4}\right) * DAP^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

g = área transversal (m²)

π : constante (3,14159265)

DAP: diámetro a la altura del pecho (1,30 m)

$$\text{Volumen aparente} \quad v = g * ht \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

v : volumen aparente (m³)

ht : altura total del árbol individual (m)

$$\text{Área basal} \quad AB = g * N \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

AB: Área basal por hectárea (m²/ha)

N: Número de árboles por hectárea

$$\text{Volumen aparente por hectárea} \quad V = v * N \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

V: Volumen aparente por hectárea (m³/ha)

Para las mediciones de copa se realizó un muestreo partiendo del procesamiento de los datos del censo del año 2,5. Se hizo una selección aleatoria de los datos, estratificando los valores de DAP iguales o mayores a 5 cm (por lo que se utilizó un total de 3.084 árboles, 174 eran menor a este diámetro) con el fin de que esta selección fuera representativa de la población, teniendo en cuenta la variabilidad y naturaleza de los datos. Esta estratificación se realizó dentro de cada tratamiento, estableciendo terciles según el rango de DAP como se muestra en Tabla 1. En el tratamiento 2F (160 árboles/ha) se seleccionaron 10 árboles por tercil y por bloque, totalizando 30 árboles por tercil y 90 árboles en total. En el tratamiento 4F (229 árboles/ha) se seleccionaron 20 árboles por tercil y por bloque, alcanzando 60 árboles por tercil y un total de 180 árboles. El total seleccionado de forma aleatoria fue de 270 árboles que se midieron al año 3,6. Las variables obtenidas para los individuos seleccionados fueron diámetro de copa (dc , en m), longitud de copa viva (lcv , en m), porcentaje de copa (PC, %) y la relación entre el diámetro de copa y diámetro a la altura del pecho (dc/DAP). Para obtener el dc se utilizó el hipsómetro Vertex IV, se midieron cuatro radios (dos en el sentido de la fila N-S y dos perpendiculares a ella, en sentido E-O) teniendo en cuenta la proyección de la copa sobre el suelo. Para la variable

3.4 Análisis estadístico

La selección aleatoria de los árboles para mediciones de copa y el posterior análisis de las diferentes variables en estudio se ejecutó mediante el software estadístico R, en su interfase RStudio [131]. Se realizó un análisis estadístico descriptivo para las variables dendrométricas de fuste a los 2,5 y 3,6 años, y de copa a los 3,6 años para los tratamientos 2F y 4F. Además, para las variables dc y DAP se realizaron los gráficos de dispersión con línea de tendencia por tercil con fines descriptivos y la prueba de correlación de Pearson para medir la relación lineal entre ellas.

Por otro lado, se realizó una comparación entre tratamientos para evaluar su efecto en las distintas variables dependientes, donde se corrió un modelo lineal de clasificación asociado a un DBCA utilizando tratamientos y bloques como factor (Tabla 2). Este modelo se ajustó a través de la función *lm()* del paquete stats de R, para posteriormente efectuar un análisis de varianza (ANOVA) y evaluar si las diferencias en las variables entre tratamientos son estadísticamente significativas. Además, utilizando el paquete *emmeans* se calculó las medias ajustadas a través de la función *emmeans()* para cada tratamiento, controlando el efecto de los bloques. Por último, se realizó la comprobación de los supuestos del modelo lineal mediante el test de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk, gráficos QQ-plot) y homocedasticidad de varianzas (prueba de Levene). Para las características de fuste se modeló para ambos años, totalizando 12 modelos y para características de copa un total de 4 modelos. Durante todo el análisis se trabajó con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$).

El modelo lineal de clasificación utilizado para realizar un análisis de varianza de efectos fijos en un DBCA es el siguiente: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$

Siendo Y_{ij} la variable de respuesta del i-ésimo tratamiento en la j-ésima repetición, la cual puede referirse a cualquiera de las variables presentadas en Tabla 2; μ es la media general de las observaciones; τ_i es el efecto relativo del i-ésimo tratamiento, siendo $i = 2F, 4F$; β_j el efecto relativo del j-ésimo bloque, siendo $j = 1, 2, 3$; ε_{ij} es el error aleatorio, que supone que son variables aleatorias idénticas, independientes y normalmente distribuidas, con esperanza cero y varianza σ^2 . Se supone, además, que no hay interacción bloque por tratamiento.

Tabla 2. Variables dependientes del modelo lineal de clasificación. Elaboración propia

Variables	Fuste*	Copa*
Dependientes	DAP	dc
	ht	lcv
	g	PC
	AB	dc/DAP
	v	
	V	

***Fuste:** Diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (ht), área transversal (g), área basal (AB), volumen aparente (v), volumen aparente por hectárea (V).

***Copa:** Diámetro de copa (dc), longitud de copa viva (lcv), porcentaje de copa (PC), relación entre diámetro de copa y diámetro a la altura del pecho (dc/DAP).

4. RESULTADOS

4.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes

4.1.1 Diámetro a la altura del pecho

4.1.1.1 Análisis descriptivo

La Fig. 6 muestra la distribución de los DAP para los tratamientos 2F y 4F a los 2,5 años. En ambos tratamientos la mayoría de los árboles tienen un DAP que oscila entre 7,7 y 10,7 cm, siendo el intervalo de 8,7-9,7 cm el que concentra más observaciones, especialmente en el tratamiento 4F, con 387 árboles. La media del DAP es similar para ambos tratamientos, siendo ésta de 8,32 cm en 2F con una desviación estándar de 2,1 cm (25,24%) y 8,60 cm para el tratamiento 4F con un desvío de 2,06 cm (23,95%), lo que indica una dispersión moderada en torno a la media. El tratamiento 4F tuvo una mayor concentración de valores en los intervalos superiores y presentó más variabilidad en comparación con el tratamiento de 2F.

A los 3,6 años el tratamiento 2F arrojó una media de 12,7 cm (4,38 cm mayor que a los 2,5 años), y un desvío de 2,96 cm (21,18%), concentrando el mayor número de árboles en el intervalo 12,4 a 13,4 con 190 observaciones. En cambio, en el tratamiento de 4F se obtuvo una media de 13,96 cm, siendo 0,8 cm mayor que el tratamiento 2F y 4,88 mayor que el año anterior, con un desvío de 3,12 cm (22,92%) y un pico de frecuencia máxima en el intervalo de 13,4 cm a 14,4 cm; alcanzando 235 árboles. Ambos tratamientos presentaron una distribución aproximadamente simétrica, no observándose valores extremos (Fig. 7).

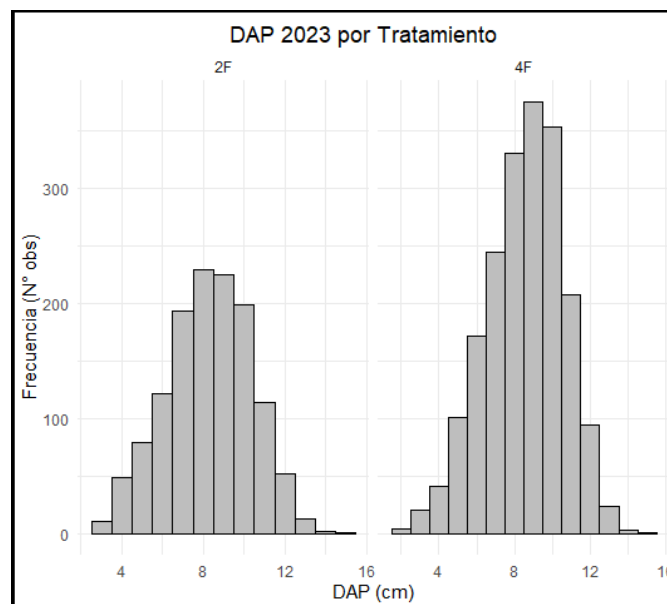


Fig. 6. Distribución de frecuencias absolutas de DAP a los 2,5 años. Elaboración propia

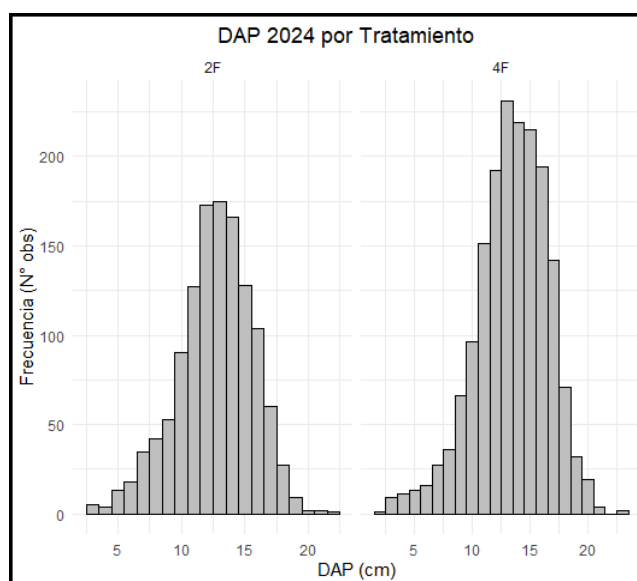


Fig. 7. Distribución de frecuencias absolutas de DAP año 3,6. Elaboración propia

4.1.1.2 Análisis estadístico

En la tabla 3 se muestran las medias estimadas del ANOVA para los dos años. Para los 2,5 años los tratamientos 2F y 4F mostraron medias muy cercanas. El p-valor asociado a esta comparación es mayor a 0,05, lo que indicó que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre ambos tratamientos. Por lo tanto, no se puede concluir que los tratamientos 2F y 4F tengan un impacto diferencial sobre la variable DAP a los 2,5 años.

A los 3,6 años el tratamiento 2F presentó una media ajustada menor que el tratamiento 4F. En este caso el p-valor también fue mayor a 0,05, lo que nuevamente sugiere que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Si bien para ambos años no se encontraron diferencias significativas para la variable DAP entre los tratamientos 2F y 4F, los valores medios del DAP son consistentemente más altos para el tratamiento 4F.

Tabla 3. ANOVA y medias estimadas para diámetro a la altura del pecho. Elaboración propia

<i>Variable</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor*</i>
DAP 2,5 años	2F	8,28	0,535	0,7114
	4F	8,60	0,535	
DAP 3,6 años	2F	12,7	0,497	0,3672
	4F	13,5	0,497	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.1.2 Altura total

4.1.2.1 Análisis descriptivo

El histograma que se muestra en la Fig. 8 para la variable ht a los 2,5 años, muestra una distribución aproximadamente simétrica, con la mayor concentración de observaciones en el rango de 6,7 a 8,7 m, con 326 árboles en el tratamiento de 2F y 454 en el de 4F. La frecuencia máxima se encontró en ese intervalo para ambos tratamientos, lo que sugiere que la mayoría de los árboles tienen alturas moderadas. El tratamiento 2F presentó un promedio de 6,81 m con una desviación estándar de 1,54 m (22,61%), lo que sugiere que las alturas se distribuyeron de manera más compacta en torno a la media en comparación con el tratamiento 4F, que presentó un desvío de 1,62 m con una media en 7,21 m (22,47%). Con respecto a la altura total al año 3,6 ambos tratamientos tuvieron la mayoría de los árboles concentrados en el rango de 9,7 a 12,7 m. La media de ht para el tratamiento 2F fue de 10,43 m, mientras que para el tratamiento 4F fue de 10,60 m. En términos de variabilidad, ambos tratamientos presentaron un desvío estándar similar, alrededor de 2,29 m (21,96% y 21,60%, respectivamente). Los valores extremos son ligeramente mayores en 2F (ht máxima de 17,4 m) que en 4F (17 m), aunque ambos tratamientos tienen árboles con alturas mínimas cercanas a 3 metros. En cuanto a la frecuencia, en el tratamiento 4F se observó una mayor concentración de árboles en los intervalos superiores (entre 11,7 y 12,7 metros), mientras que en 2F la distribución está más repartida entre los intervalos de 9,7 a 11,7 metros, como se observa en la Fig. 9.

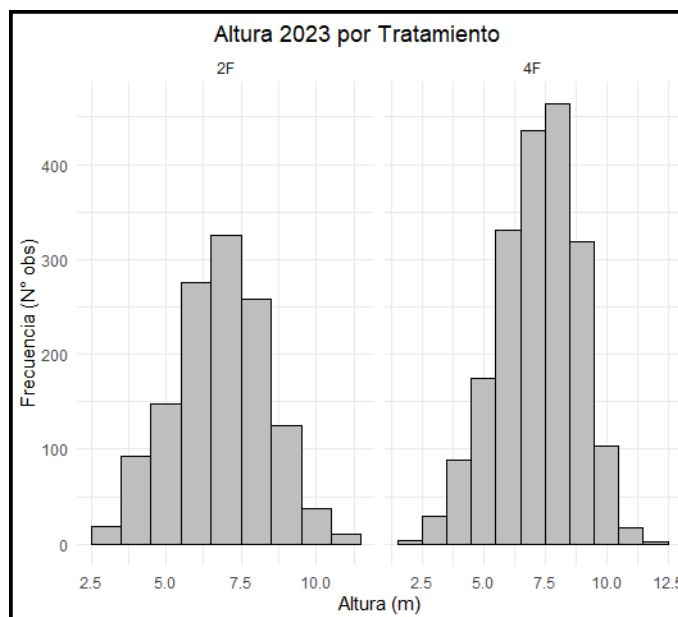


Fig. 8. Distribución de frecuencias absolutas de ht 2,5 años. Elaboración propia

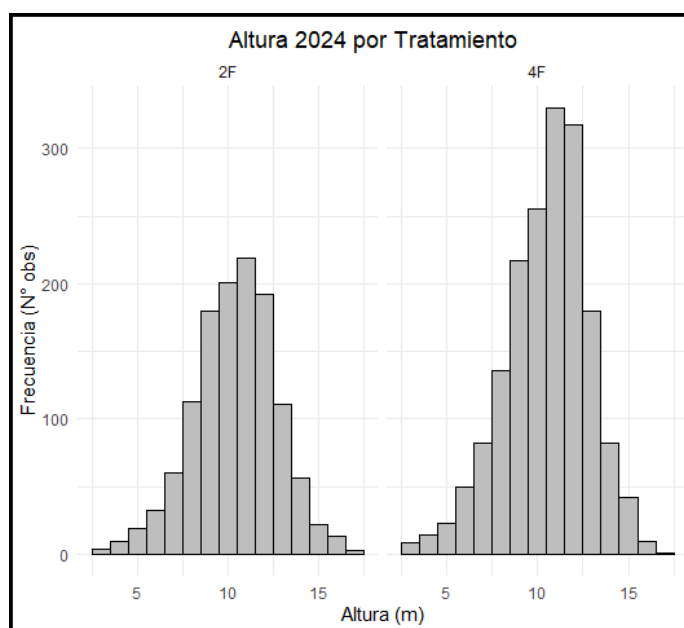


Fig. 9. Distribución de frecuencias absolutas de ht 3,6 años. Elaboración propia

4.1.2.2 Análisis estadístico

En la tabla 4 se observan los resultados para la variable ht, donde a los 2,5 años la media ajustada del tratamiento 4F es mayor que para 2F. El p-valor resultante de este análisis es mayor a 0,05, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para ht. Los resultados estadísticos para los 3,6 años se comportan igual, mostrando que no existen diferencias estadísticamente significativas cuando comparamos la altura total entre tratamientos.

Tabla 4. ANOVA y medias estimadas para altura total. Elaboración propia

<i>Variable</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
<i>ht 2,5 años</i>	2F	6,78	0,292	0,3939
	4F	7,22	0,292	
<i>ht 3,6 años</i>	2F	10,4	0,303	0,6502
	4F	10,6	0,303	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.1.3 Área transversal y Área Basal

4.1.3.1 Análisis descriptivo

Para la edad de 2,5 años, los valores de g para el tratamiento de mayor densidad son un poco mayores que para el tratamiento de menor densidad arbórea. Se obtuvo una media de $0,0061 \text{ m}^2$ para 4F en comparación del tratamiento 2F que presenta una media de $0,0058 \text{ m}^2$, presentando un desvío de $0,0027$ en ambos tratamientos. Además, presenta una mediana de $0,0055 \text{ m}^2$ para 2F y de $0,0061 \text{ m}^2$ para 4F, y los rangos intercuartílicos (IQR) indican que el 50% de los datos para 2F se encuentran entre $0,0036$ y $0,0077 \text{ m}^2$, mientras que para 4F están entre $0,0042$ y $0,0080 \text{ m}^2$. Como se observa en la Figura 10, ambos tratamientos presentan valores atípicos en los extremos superiores por encima de $0,015 \text{ m}^2$.

En la Fig. 11 se muestra que para el año 3,6, los valores de g para el tratamiento 4F son algo mayores que para 2F, con los promedios ligeramente superiores a las medianas, siendo $0,0134 \text{ m}^2$ para 2F y $0,0150 \text{ m}^2$ para 4F. La mediana de esta variable es de $0,0131 \text{ m}^2$ para 2F y de $0,0147 \text{ m}^2$ para 4F, lo que indica una leve diferencia central. El IQR para 2F se sitúa entre $0,0095$ y $0,0172 \text{ m}^2$, mientras que para 4F es mayor, con un IQR entre $0,0151$ y $0,0194 \text{ m}^2$, lo que indica mayor dispersión en este último tratamiento. Ambos tratamientos presentan varios valores atípicos, en particular por encima de $0,03 \text{ m}^2$. La desviación estándar es de $0,0057 \text{ m}^2$ para 2F y de $0,0063 \text{ m}^2$ para 4F, lo que sugiere mayor variabilidad en el tratamiento 4F.

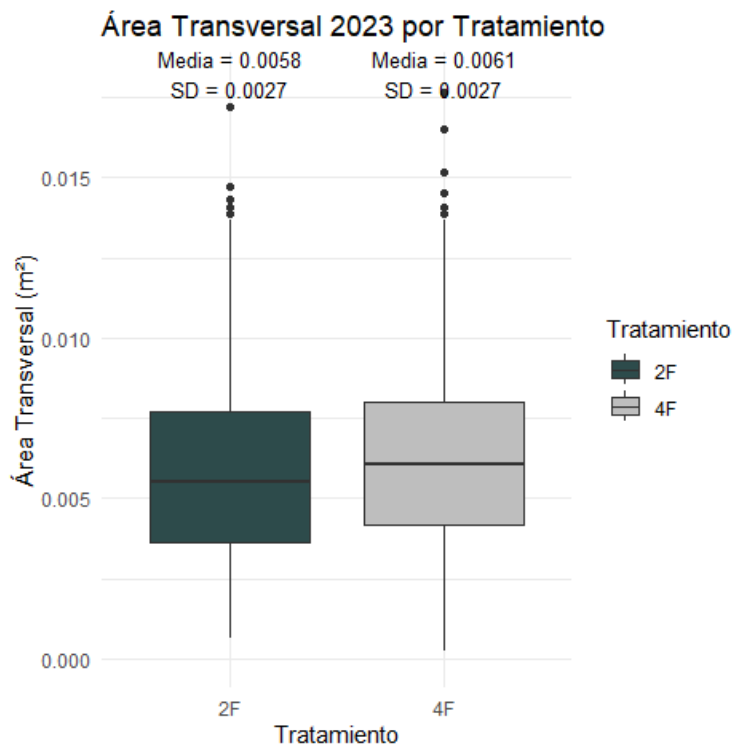


Fig. 10. Área transversal para los tratamientos 2F y 4F a los 2,5 años. Elaboración propia

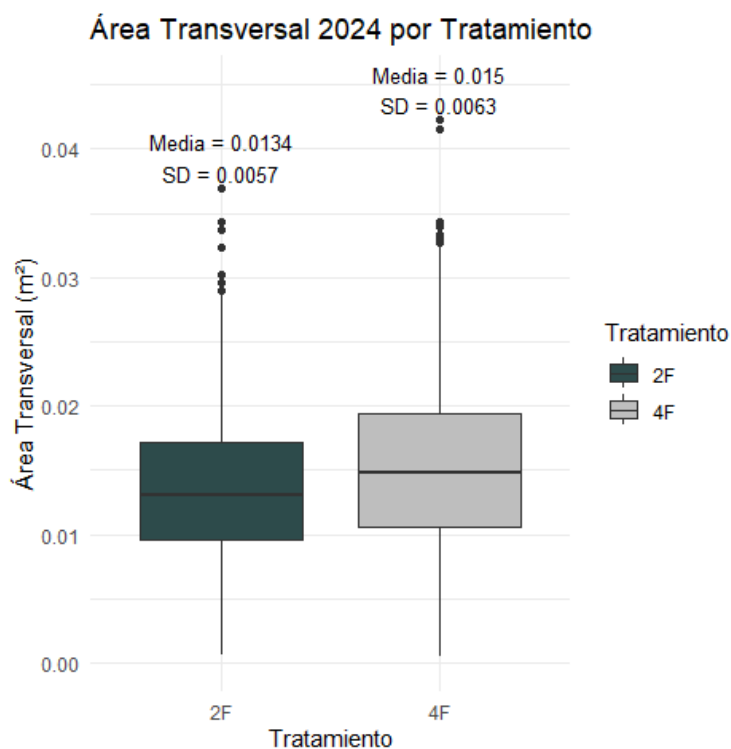


Fig. 11. Área transversal para los tratamientos 2F y 4F a los 3,6 años. Elaboración propia

4.1.3.2 Análisis estadístico

La tabla 5 muestra diferencias en el promedio de g para ambos tratamientos. Si bien la media es mayor para 4F con respecto a 2F, ambos presentan un p-valor mayor a 0,05, indicando que no hay diferencia significativa entre tratamientos. Para los 3,6 años, los resultados tienen comportamiento similar al año anterior en ambos tratamientos y un p-valor también por encima de 0,05, lo que también indica que no hay diferencia significativa entre los tratamientos.

Tabla 5. ANOVA y medias estimadas para área transversal (m²). Elaboración propia

	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
g 2,5 años	2F	0,00573	0,000687	0,7106
	4F	0,00615	0,000687	
g 3,6 años	2F	0,0134	0,00095	0,3223
	4F	0,0151	0,00095	

* Nivel de significancia (α): 0,05

Sin embargo, cuando se realiza la comparación del AB teniendo en cuenta la diferencia de densidad de los dos tratamientos, se comienzan a ver diferencias, como se muestra en tabla 6.

Para los 2,5 años, el AB para el tratamiento de 4F fue de 1,48 m²/ha, mayor que para el tratamiento de 2F con 0,92 m²/ha. El p-valor es de 0,0648, lo que indica que las diferencias entre los tratamientos están cerca de ser significativas, pero no alcanzan el límite de significancia estadística (0,05). En cambio, para la edad 3,6, la media estimada para el área basal fue de 2,14 m²/ha para el tratamiento 2F y de 3,63 m²/ha para el tratamiento 4F. En este caso, el p-valor es menor que 0,05, indicando que las diferencias entre los tratamientos son estadísticamente significativas. Este resultado sugiere que el tratamiento 4F resultó en un incremento significativamente mayor en el área basal por hectárea en comparación con el tratamiento 2F en la edad 3,6.

Tabla 6. ANOVA y medias estimadas para área basal (m²/ha). Elaboración propia

	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
AB 2,5 años	2F	0,92	0,106	0,06484
	4F	1,48	0,106	
AB 3,6 años	2F	2,14	0,123	0,01328*
	4F	3,63	0,123	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.1.4 Volumen Aparente

4.1.4.1 Análisis descriptivo

A los 2,5 años, el tratamiento 4F generó volúmenes promedios por árbol mayores (0,0481 m³) en comparación con el tratamiento 2F (0,0431 m³) con un desvío similar de 0,0279 m³ y 0,0287 m³, respectivamente, lo que sugiere un impacto positivo del tratamiento sobre el crecimiento (Fig. 12). La mediana también fue superior en 4F (0,0442 m³/árbol frente a 0,0382 m³/árbol en 2F), lo que indica que la mayoría de las observaciones en este tratamiento tendieron a ser mayores. Sin embargo, tanto 2F como 4F presentaron una dispersión similar y valores atípicos que alcanzaron un máximo de 0,1786 m³/árbol para 2F y 0,1852 m³/árbol para 4F. Aunque el tratamiento 4F muestra un rendimiento levemente mejor, las similitudes en la dispersión sugieren que podría haber otros factores que estén influyendo en la variabilidad de los resultados.

Para la edad 3,6 las diferencias entre los tratamientos son más notables (Fig. 13). El valor promedio por árbol para 4F fue de 0,1713 m³/árbol con un desvío de 0,097 m³, resultando mayor que el valor promedio de 2F (0,1504 m³/árbol) el cual tuvo un desvío de 0,088 m³. La mediana para 4F también fue superior llegando a los 0,1606 m³/árbol frente a 0,1375 m³/árbol en 2F, lo que refleja un crecimiento más sostenido en la mayoría de los individuos. Ambos tratamientos presentaron un mayor IQR, con valores extremos máximos de 0,6481 m³/árbol para 4F y 0,5733 m³/árbol para 2F, lo que evidencia un crecimiento notablemente mayor en algunos sitios. La mayor dispersión en 3,6 años indica que, si bien 4F sigue siendo el tratamiento con mejores

resultados, ambos tratamientos exhibieron mayor variabilidad, lo que podría deberse a otros factores adicionales.

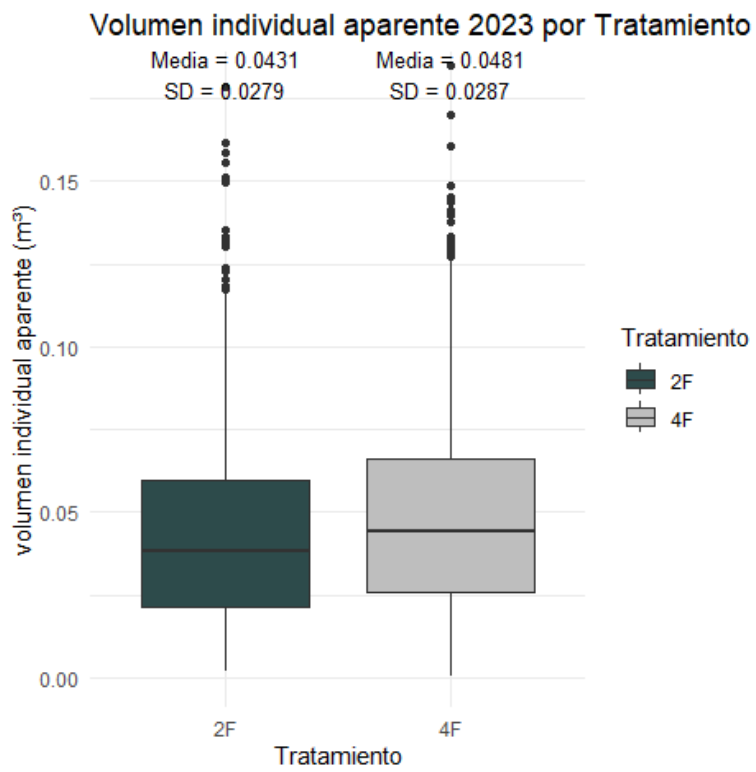


Fig. 12. Volumen individual aparente para los tratamientos 2F y 4F a los 2,5 años. Elaboración propia

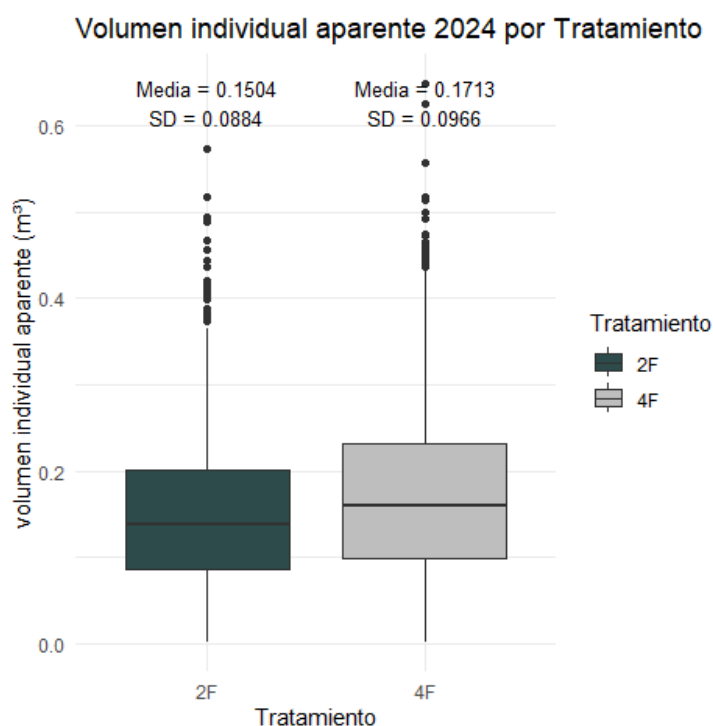


Fig. 13. Volumen individual aparente para los tratamientos 2F y 4F a los 3,6 años. Elaboración propia

4.1.4.2 Análisis estadístico

Al comparar los tratamientos para la variable v se observa que a los 2,5 años el tratamiento 4F tenía una media algo mayor que el tratamiento 2F siendo $0,0482 \text{ m}^3/\text{árbol}$ y $0,0426 \text{ m}^3/\text{árbol}$, respectivamente. El p-valor resultante de la comparación entre ambos tratamientos es mayor a 0,05, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas para esta variable a la edad de 2,5. Al observar los valores de volumen individual aparente para los 3,6 años, los valores promedio aumentaron considerablemente en ambos tratamientos. La media para 2F fue de $0,150 \text{ m}^3/\text{árbol}$ y para 4F de $0,173 \text{ m}^3/\text{árbol}$. Sin embargo, como se presenta en tabla 7, el p-valor sigue siendo mayor a 0,05 indicando al igual que en el año anterior, que las variaciones entre los tratamientos no son suficientes como para considerarse estadísticamente diferentes.

Tabla 7. ANOVA y medias estimadas para volumen individual aparente (m³). Elaboración propia

	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
v 2,5 años	2F	0,0426	0,00635	0,5967
	4F	0,0482	0,00635	
v 3,6 años	2F	0,150	0,0137	0,3656
	4F	0,173	0,0137	

* Nivel de significancia (α): 0,05

En cambio, cuando pasamos a comparar la variable V (m³/ha) para ambos tratamientos se observaron cambios más relevantes, similar a lo que ocurrió con el AB. En la tabla 8 se puede observar que a los 2,5 años el tratamiento 2F presentó una media de 6,39 m³/ha, mientras que el tratamiento 4F tenía una media mayor de 10,67 m³/ha. El p-valor asociado a esta comparación es de 0,07824, lo que indica que, aunque hay una diferencia apreciable, no es estadísticamente significativa ya que p-valor > α .

No obstante, para los 3,6 años las diferencias entre los tratamientos fueron más pronunciadas. Si bien el tratamiento 2F tuvo un promedio de 22,6 m³/ha, 4F alcanzó un valor mucho mayor de 38,7 m³/ha. Para ese año, el p-valor es menor a 0,05 lo que indica existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.

Tabla 8. ANOVA y medias estimadas para volumen aparente por hectárea. Elaboración propia

	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
V 2,5 años	2F	6,39	0,901	0,07824
	4F	10,67	0,901	
V 3,6 años	2F	22,6	1,62	0,01983*
	4F	38,7	1,62	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.2 Parámetros dendrométricos de copa

4.2.1 Diámetro de copa

4.2.1.1 Análisis descriptivo

En la figura 14 se puede observar que en el dc para el tercil 1, ambos tratamientos tienen medianas similares, pero el tratamiento 4F presenta una mayor dispersión, con un IQR de 1,06 m frente a 0,93 m en 2F. En el tercil 2 el tratamiento 4F tiene un dc ligeramente superior, presentando una mediana de 4,27 m frente a 4,02 m en 2F, y también mayor dispersión (0,82 m contra 0,60 m). Por último, en el tercil 3 se muestra un aumento notable del dc en el tratamiento 4F con una mediana de 4,88 m en comparación con 2F que presentó una mediana de 4,51 m, y además una mayor variabilidad con un IQR de 1,31 m frente a 2F con 0,67 m.

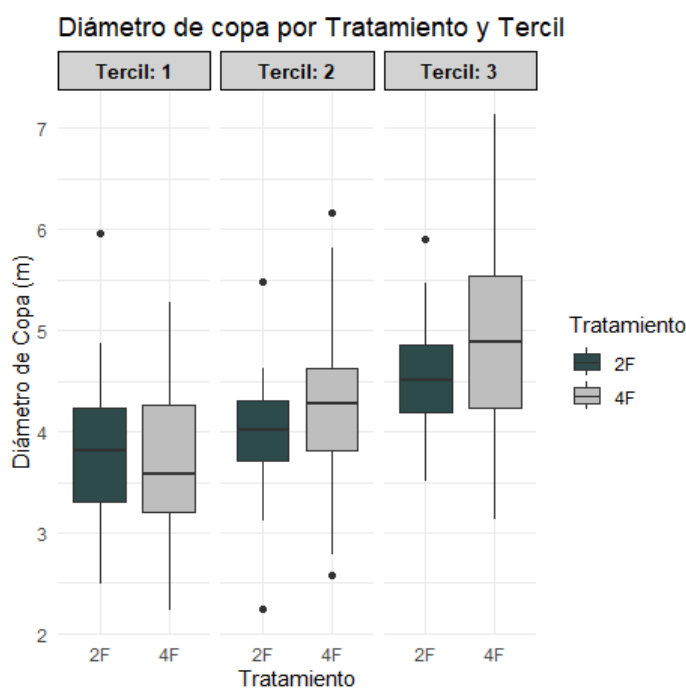


Fig. 14. Diámetro de copa (m) por tercil (1, 2 y 3) y tratamiento (2F y 4F). Elaboración propia

4.2.1.2 Análisis estadístico

Cuando se pasa al análisis comparativo en la tabla 9, se ve que los tratamientos en el tercil 1 no arrojaron diferencias significativas, sin embargo, en los terciles 2 y 3 sí se diferencian estadísticamente, presentado ambos un p-valor menor a 0,05. Si bien la media del tratamiento 4F para el tercil 1 fue levemente menor que en el tratamiento 2F, para los siguientes dos terciles la relación se invirtió. Es decir, la media para 4F en ambos terciles es aproximadamente de 0,37 m mayor que para el tratamiento 2F, con una exactitud similar en la estimación de estas medidas presentando un error estándar de 0,12 m para 2F y 0,08 m para 4F, lo que indica que uno de los tratamientos tuvo un efecto superior sobre el dc en comparación con el otro.

Tabla 9. ANOVA y medias estimadas para diámetro de copa (m). Elaboración propia

	<i>Tercil</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
<i>dc</i>	1	2F	3,79	0,12 68	0,5339
	1	4F	3,69	0,08 97	
	2	2F	3,98	0,11 65	0,0218*
	2	4F	4,32	0,08 24	
	3	2F	4,57	0,12 66	0,0111*
	3	4F	4,95	0,08 81	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.2.2 Longitud de copa viva

4.2.2.1 Análisis descriptivo

Para la lcv presentada en Fig. 15, se puede ver que en el tercil 1 el tratamiento de 2F tuvo un promedio mayor, de 6,70 m, en comparación con 4F que presentó una media de 6,53 m, aun así, el tratamiento 4F muestra una mayor dispersión de los datos (IQR de 1,83 m frente a 1,35 m para 2F). Para el tercil 2, el tratamiento 2F presentó una media de 7,26 m y en 4F es de 7,41 m, sin embargo, esta vez el tratamiento 2F fue el que presentó una mayor dispersión. Los resultados para el tercil 3, presentaron un promedio diferente, siendo mayor para 4F con 8,91 m frente a 2F con 8,70 m, y aunque presentaron una mayor lcv en este tercil, el tratamiento 4F tiene una dispersión mayor, presentando un IQR de 1,78 m frente a 1,55 m en 2F. En general, el tratamiento 4F tuvieron una mayor dispersión en la lcv dentro de cada tercil, pero las medianas entre ambos tratamientos fueron similares.

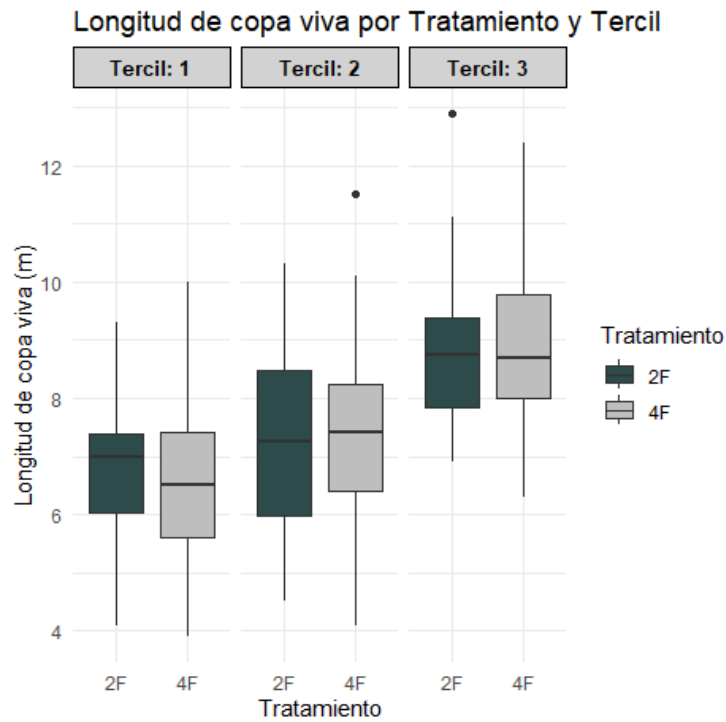


Fig. 15. Longitud de copa viva (m) por tercil (1, 2 y 3) y tratamiento (2F y 4F). Elaboración propia

4.2.2.2 Análisis estadístico

Cuando se realiza el ANOVA para lcv, la diferencia entre los tratamientos dentro de cada tercil fue mínima, observando que para el tercil 1 el promedio del tratamiento 2F fue levemente mayor que para el tratamiento 4F. Sin embargo, para los terciles mayores esto se revierte, siendo el promedio de 4F mayor que el de 2F, pero manteniendo una desviación similar en todos los terciles. El p-valor obtenido es mayor a 0,05 lo que indica que no existe una diferencia significativa entre tratamientos (Tabla 10).

Tabla 10. ANOVA y medias estimadas para longitud de copa viva (m). Elaboración propia

	<i>Tercil</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
<i>lev</i>	1	2F	6,70	0,232	0,5557
	1	4F	6,53	0,164	
	2	2F	7,26	0,261	0,6407
	2	4F	7,41	0,185	
	3	2F	8,72	0,242	0,5218
	3	4F	8,90	0,169	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.2.3 Porcentaje de copa

4.2.3.1 Análisis descriptivo

En la Fig. 16 se observa que en el tercil 1 el tratamiento 2F presentó un promedio de PC de 69,32% con una dispersión de 7,15%. Los valores oscilaron entre 54,95% y 86,11% presentando una mediana de 68,97%. El tercil 2 tuvo un promedio de 66,42% con una desviación estándar de 6,37% y un rango entre 50,5 y 80%. La mediana sugiere que existe menor variabilidad en comparación con el tercil uno, siendo de 66,87%. El tercil 3 tuvo el mayor valor promedio de PC de 70,15% y una dispersión bastante menor comparado con los otros dos terciles, siendo ésta de 3,59%. El rango de estos valores se encontró entre 62,16 y 77,25%, con una mediana de 70,7% indicando mayor homogeneidad en este grupo.

Para el tratamiento de 4F, la variable presentó para el tercil 1 un promedio de 70,7% con una dispersión de 7,12%, abarcando valores entre 54,93 y 82,11%, y la mediana de 72,3% siendo la más alta en este tratamiento. En cuanto al tercil 2, al igual que en el tratamiento de 2F, el promedio de PC fue el menor de los tres terciles siendo en este caso de 67,52%, presentando una dispersión de los datos de 5,80%. Los valores se encuentran en un rango entre 51,79 y 80,65% y una mediana de 68,22%, lo que indica una menor variabilidad en comparación al primer tercil. Finalmente, el tercil 3 fue el que tuvo el mayor PC promedio del tratamiento 4F con 71,45%, una dispersión menor que los terciles anteriores, de 4,32% y valores de PC entre 58,62 y 80%. La mediana fue de 72,04% lo que muestra una distribución más homogénea respecto a los otros terciles.

En ambos tratamientos, el tercil 3 mostró los valores más altos para la variable, con menor variabilidad respecto a los otros grupos. El tratamiento de 4F presentó valores de PC ligeramente superiores al de 2F, en todos los terciles estudiados, presentando diferencias más notables en el tercil 1 y 3. La dispersión de los datos fue generalmente mayor en los primeros terciles y menor en los últimos, indicando que los árboles con mayor PC son más homogéneos en su distribución.

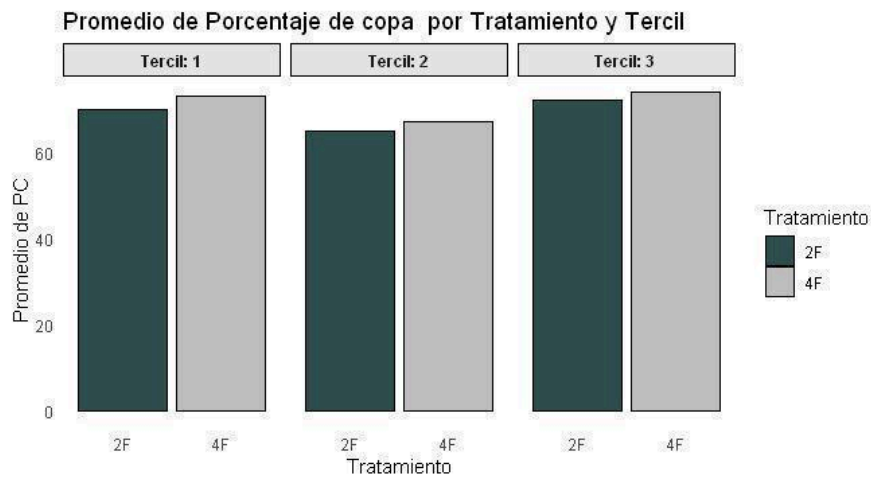


Fig. 16. Porcentaje de copa por tercil (1, 2 y3) y tratamiento (2F y 4F). Elaboración propia

4.2.3.2 Análisis estadístico

En la tabla 11 se muestra el ANOVA realizado para cada tercil para PC donde no se encontró diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 11. ANOVA y medias estimadas para porcentaje de copa. Elaboración propia

	<i>Tercil</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
<i>PC</i>	1	2F	69,32	1,311	0,3909
	1	4F	70,70	0,927	
	2	2F	66,42	1,105	0,4196
	2	4F	67,52	0,781	
	3	2F	70,15	0,754	0,1609
	3	4F	71,45	0,525	

* Nivel de significancia (α): 0,05

4.2.4 Índice de espacio vital

4.2.4.1 Análisis descriptivo

El IEV obtenido presentó variaciones según el tratamiento y el tercil, evidenciando diferencias en la ocupación del espacio por los árboles en cada condición. En el tratamiento 2F, el IEV promedio disminuyó progresivamente de 34,07 en el tercil 1 a 28,87 en el tercil 3, con una mayor dispersión en el primer tercil (4,59) y menor en el tercero ($\pm 3,38$), lo que sugiere una mayor homogeneidad en árboles con menor IEV. En el tratamiento 4F, se observó un patrón similar, con valores que oscilaron entre 33,06 y 29,98, siendo el tercil 2 el de mayor dispersión (4,2). Comparando ambos tratamientos, 4F presentó valores levemente superiores en los terciles inferiores, lo que indica una menor competencia por espacio respecto a 2F, especialmente en árboles con mayor desarrollo. En general, la reducción del IEV en los terciles superiores refleja una tendencia hacia estructuras más homogéneas a medida que los árboles alcanzan su máximo desarrollo.

En cuanto a la correlación de Pearson para las variables dc y DAP, se observó una correlación fuerte, moderada y moderada-fuerte para los terciles 1, 2 y 3, respectivamente. En los tres casos la relación es positiva y estadísticamente significativa con un p-valor menor al nivel de significancia (Tabla 12), lo que indica que estas variables están relacionadas linealmente. Esta tendencia positiva también se pudo observar en los gráficos de dispersión realizados para cada tercil (Fig. 17, 18 y 19). Si bien se puede ver que los datos tienen cierta dispersión alrededor de la línea de tendencia, especialmente en el tercil 2 donde la dispersión de los puntos es mayor y la correlación es más débil (relación menos ajustada a la línea de tendencia en comparación a los demás terciles), se puede observar que en general a medida que crece el DAP también se incrementa el dc.

Tabla 12. Correlación de Pearson para relación dc/DAP para los terciles 1, 2 y 3.

	<i>Tercil</i>	<i>Coefficiente de Correlación (r)</i>	<i>p-valor</i>
<i>dc/DAP</i>	1	0,714	$2,925 \times 10^{-15}$ *
	2	0,491	$8,944 \times 10^{-7}$ *
	3	0,644	$4,229 \times 10^{-12}$ *

* Nivel de significancia (α): 0,05

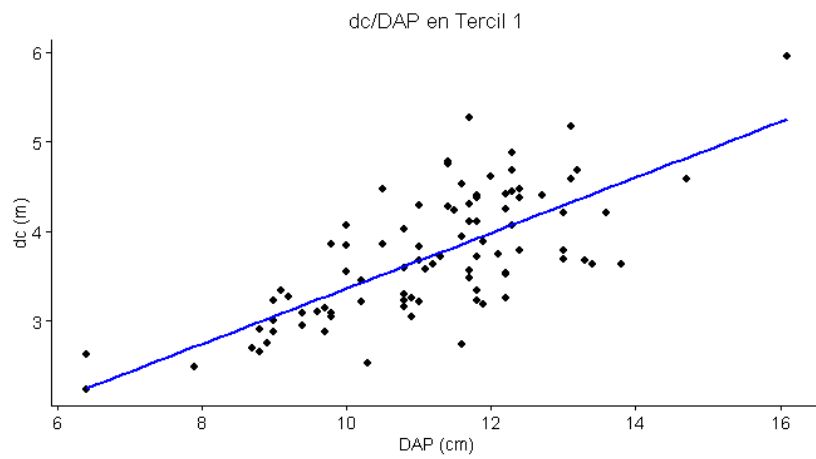


Fig. 17. Gráfico de dispersión para dc (m) y DAP (cm) en tercil 1. Elaboración propia

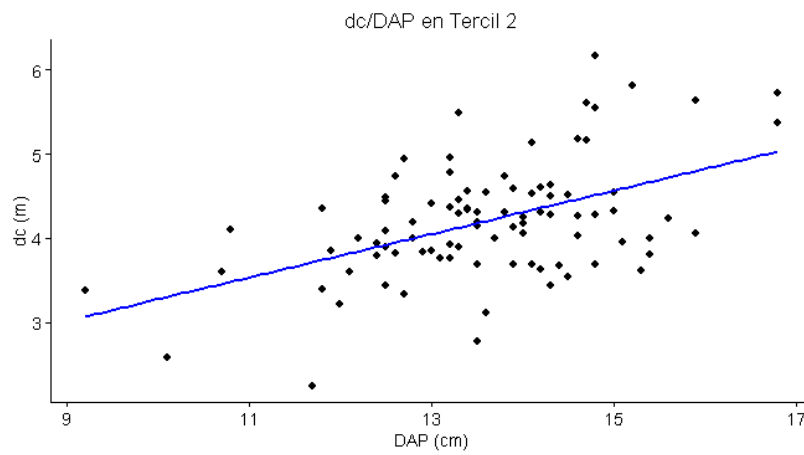


Fig. 18. Gráfico de dispersión para dc (m) y DAP (cm) en tercil 2. Elaboración propia

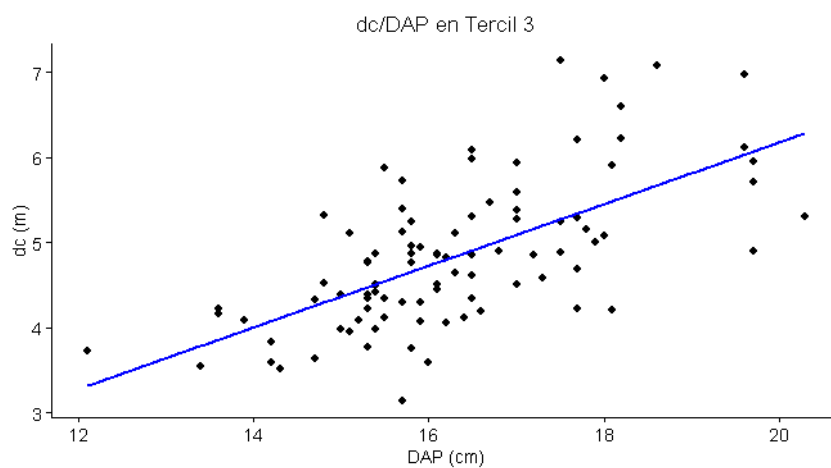


Fig. 19. Gráfico de dispersión para dc (m) y DAP (cm) en tercil 3. Elaboración propia

4.2.4.2 Análisis estadístico

Por otro lado, la comparación entre tratamientos por terciles para esta relación no arrojó diferencias estadísticamente significativas a los 3,6 años, para ninguno de los terciles analizados con un intervalo de confianza de 0,95 (Tabla 13).

Tabla 13. ANOVA y medias estimadas para relación entre diámetro de copa (m) y diámetro a la altura del pecho (cm). Elaboración propia

	<i>Tercil</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Media</i>	<i>SE</i>	<i>p-valor</i>
<i>dc/DAP</i>	1	2F	34,07	0,798	0,3043
	1	4F	33,06	0,564	
	2	2F	29,94	0,755	0,0945
	2	4F	31,51	0,534	
	3	2F	28,87	0,642	0,1584
	3	4F	29,98	0,447	

* Nivel de significancia (α): 0,05

5. DISCUSIÓN

5.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes

El manejo de la densidad arbórea en los SSP es una decisión de suma importancia ya que impacta directamente sobre el crecimiento de los árboles. Algunos autores [132] [133] destacan que una menor densidad arbórea asociada con factores ambientales positivos (disponibilidad de luz, agua y nutrientes) promueve el crecimiento individual en diámetro del *Eucalyptus* en un SSP en comparación con monocultivos [134]-[136]. Varios artículos reportan que el mayor crecimiento en diámetro se observa en poblaciones menos densas [7] [103] [105] [137] [138] [139], destacando la importancia del crecimiento diametral en la productividad [109].

Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo señalan que no hubo efecto significativo de la densidad arbórea sobre las variables dendrométricas de DAP, ht, g y v en los dos momentos de evaluación (2,5 y 3,6 años). Esto concuerda con los resultados obtenidos por Ribaski et. al. [140], quienes tampoco encontraron diferencias significativas en el crecimiento de los árboles (DAP y ht) a los 2 años, entre dos densidades de plantación bien contrastantes de sistemas silvopastoriles (500 árb/ha y 1.000 árb/ha), ni en sistemas puros de 1.111 árb/ha.

Los valores obtenidos para el DAP coincidieron con los obtenidos por [7] quien a menor densidad (250 árb/ha) obtuvo menor diámetro (12,9 cm) a los 30 meses, comparado con una mayor densidad (500 árb/ha con 13,3 cm) y de manera similar para los 42 meses. No obstante, para plantaciones de edades más avanzadas, tanto para especies del género *Eucalyptus* como también para otros géneros a los 12 [138], 16 [141] y 20,8 años [142], se revirtieron los valores para DAP, reportando en los diferentes estudios mayores valores a medida que se reduce la densidad arbórea y por lo tanto la competencia entre plantas.

El incremento diamétrico obtenido para *E. grandis* en diferentes espaciamientos, muestra una mayor capacidad en el uso del espacio de esta especie brindado por poseer mayor espacio libre para su crecimiento al compararlo con otras especies [105]. Para el caso de estudio, los valores obtenidos fueron de 4,4 - 4,9 cm/año de DAP en los distintos tratamientos, encontrando resultados similares para el incremento diametral (cm/año) en la literatura [7], además el arreglo más denso presentó más variabilidad entre los datos, lo que pudo deberse a la diferencia en densidad, resultado similar al obtenido por [143].

En cuanto a la altura, diversos estudios [7] [37] [138] [140] reportaron menores valores para las menores densidades de plantación a edades tempranas, coincidiendo con los resultados reportados en este estudio. En la literatura [6] se respaldan estos resultados cuando los autores afirman el mayor crecimiento inicial en altura en plantaciones más densas, lo que es coherente también con el trabajo de [143], donde se observó que en densidades mayores las plantas “buscan” la luz presentando mayor altura que en densidades más bajas, que poseen mayor espacio por planta para su crecimiento.

Por otra parte, se encontró que el área transversal fue mayor en espaciamientos mayores, obteniendo valores de 0,0041 y 0,0053 m²/árbol a los 26 y 32 meses para distancias de 3x2 m,

comparado con valores de 0,0037 y 0,0045 m³/árbol en espaciamientos de 3x1 m para las mismas edades respectivamente [106], coincidiendo con resultados expresados en el presente trabajo.

En cuanto al volumen individual, la literatura consultada reporta que los mayores espaciamientos tienen mayor volumen por planta, según [103] para varias especies de *Eucalyptus* obtuvo resultados en arreglos de 6x3 m de 0,187 m³/árbol, en 6x4 m 0,213 m³/árbol, y en espaciamientos menores de 6x2 m 0,166 m³/árbol y en 3x2 m 0,131 m³/árbol. Según [144] este desarrollo individual se ve influenciado por la presencia y el crecimiento de los árboles circundantes, ya sean competidores o facilitadores, a través de sus interacciones. La competencia, una de las interacciones más estudiadas en biología y ecología [145], se manifiesta cuando los recursos disponibles no satisfacen las necesidades de todos los árboles para el crecimiento óptimo [144]. Numerosas investigaciones se han centrado en cuantificar el efecto de la competencia en el crecimiento arbóreo. Para esto, se han desarrollado los "Índices de Competencia", utilizados en el modelado de árboles y bosques a través de fórmulas matemáticas que consideran diversas características de un árbol y sus vecinos, como el diámetro del tronco o copa, y las distancias entre ellos, con el fin de predecir su crecimiento [146]. Uno de los más utilizados es el Índice de Densidad Relativa (IDR) propuesto por L. H. Reineke en 1933, que utiliza el DAP promedio y el número de árboles por hectárea con fines comparativos [147]. Estos autores, desarrollaron tablas de manejo con valores de referencia para *E. grandis* con el objetivo de facilitar el manejo y la gestión del rodal ayudando a comprender la ocupación del sitio y el nivel de competencia entre individuos. Según esta referencia, los individuos de la población de este estudio para los dos tratamientos evaluados (2F y 4F), se encuentran en un estado de "libre crecimiento", con un área disponible de 25 m² para su crecimiento libre de competencia por recursos con los árboles vecinos. Estos conceptos ayudan a entender los resultados obtenidos en este trabajo donde no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para las variables estudiadas.

En cuanto a las variables de la plantación o dasométricas, tanto en AB (m²/ha) como en V (m³/ha) se registraron diferencias significativas a los 3,6 años, observándose una disminución de AB para el tratamiento con menor densidad arbórea. Estos resultados son coincidentes con estudios realizados por otros autores con especies de *Eucalyptus* y de otros géneros [37] [106] [137] [148]. Se reportó en una plantación silvopastoril de *Pinus contorta* Douglas ex Loudon un descenso en el AB (m²/ha) a bajas densidades (350 - 400 árb.ha⁻¹) en comparación con una plantación forestal más densa [137].

Así como para el AB, el incremento medio anual (IMA - m³/ha/año) y el V (m³/ha) son influenciados por el número de árboles, diversos autores afirman que para arreglos más densos (espaciamientos de 3,33 m x 2 m; 3,33 m x 3 m; 5 m x 2 m) se obtuvieron mayores productividades en volumen (16,71 m³/ha a 18,75 m³/ha) en comparación con tratamientos con mayor espaciamiento (10 m x 2 m; 10 m x 3 m; 10 m x 4 m), donde reportaron valores de 3,23 a 6,95 m³/ha [109], similares a resultados obtenidos también por [138]. Además, los arreglos más densos presentan mayores incrementos en IMA. El V se ve influenciado naturalmente por el número de árboles por hectárea, lo que se reflejó en los resultados de este trabajo, obteniendo diferencias significativas en la producción volumétrica entre ambos tratamientos lo cual

coincide con los resultados de varios trabajos citados por [104], donde los autores reportan influencias de la densidad de plantación sobre la producción volumétrica, encontrando en todos los casos una tendencia al decrecimiento del volumen total con el aumento del espaciamiento.

Es importante resaltar que en el presente estudio se encontraron diferencias significativas donde era esperable encontrarlas, no en atributos individuales, ya que aún los árboles crecen de forma libre, sino en la comparación entre las diferentes densidades para parámetros poblacionales (de la plantación como un todo), ya que es parte del diseño de los tratamientos que han sido plantados de esta manera para evaluar la productividad de estos sistemas. Sin embargo, al comparar 160 árb/ha versus 229 árb/ha, el tratamiento 4F presenta aproximadamente un 43% más de recursos forestales, pero esto no necesariamente se traduce en una mayor productividad, por lo menos a las edades evaluadas. Lo anterior puede deberse a que los árboles están sujetos a limitaciones ambientales y fisiológicas que afectan su rendimiento. Algunos de los factores que inciden en estos resultados pueden ser la mortalidad, ya que no todos los árboles sobreviven o crecen a la misma tasa, y la mayor competencia puede generar más pérdidas. En este sentido se constató para 2F una mortalidad de 22,3% y para 4F un 32,2% respecto a la densidad de plantación objetivo. Por otro lado, la variabilidad ambiental, tanto las condiciones climáticas como del sitio, siendo estas evidentes en terreno donde existen pendientes pronunciadas y los árboles crecen en distintas posiciones de la ladera, bajos anegados, diferentes tipos de suelo, condiciones que pueden afectar el crecimiento y la productividad de los árboles en cada tratamiento. Sumado a esto hay una variabilidad genética importante en el material proveniente de semillas que se estima incide directamente en el resultado obtenido. De acuerdo con [149], las diferencias genéticas que existen entre procedencias en las especies de *Eucalyptus* pueden generar grandes diferencias en crecimiento en los diferentes sitios, como así también gran variabilidad en las propiedades emergentes como material para celulosa (biometría de fibras, composición química) o para madera sólida (densidad aparente básica). Resultados que prueban lo antes mencionado se encontraron en investigaciones con clones de *E. grandis* de diferentes procedencias donde se menciona que, si bien existe una importante variación en la productividad entre diferentes materiales, las diferencias entre orígenes también influyen y son mucho mayores entre procedencias [35].

5.2 Parámetros dendrométricos de copa

Las variables dendrométricas de copa evaluadas, lcv, PC y IEV, al igual que las variables dendrométricas de fuste no mostraron diferencias causadas por la densidad de plantación, es decir, por los tratamientos evaluados (2F y 4F) en cada tercil. No obstante, en la variable dc se observó que los terciles 2 y 3 se diferenciaron estadísticamente debido al efecto de la densidad. Estas variables son importantes para caracterizar el tamaño y las características de la copa de un árbol y varían según la especie, las condiciones del sitio y del nivel de competencia a la cual se encuentran sometidos en la plantación [150], [151]. Al igual que el DAP, el crecimiento de la copa de los árboles y sus variables están estrechamente asociadas y son muy sensibles a la distancia entre árboles vecinos [151].

En cuanto a la variable lcv los datos obtenidos sugieren que tiende a incrementarse en ambos tratamientos a medida que se avanza del menor al mayor tercil, lo que podría indicar una

tendencia hacia copas más largas en individuos más grandes o mejor desarrollados dentro de cada tercil.

Con respecto al diámetro de la copa, con los resultados descriptivos obtenidos, se podría decir que el tratamiento de 4F tiende a producir copas más grandes, especialmente en los individuos que se encuentran en los terciles superiores. Según el análisis general de los datos, se muestra entre tratamientos y terciles que, si bien ambos tratamientos muestran un incremento en el diámetro de copa a medida que se avanza en los terciles, 4F parece tener un mayor crecimiento y variabilidad en el diámetro de copa en general, especialmente en los individuos de dimensiones mayores. A partir del análisis de varianza se demostró que en los dos terciles superiores existen diferencias significativas, coincidiendo con [152] que menciona que el dc junto con otras variables como el porcentaje de copa, longitud de copa viva y volumen de copa, se relacionaron significativamente con el DAP, comportamiento que también fue observado en *Neltuma alba* (Griseb.) C.E.Hughes & G.P.Lewis [153], tendiendo a aumentar el dc con el incremento en DAP, lo que se refleja en este estudio. Esto podría ser relevante para la toma de decisiones de manejo forestal, dependiendo de los objetivos de crecimiento y desarrollo del dosel. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por [154], quien reportó que los árboles con copas de mayores dimensiones suelen presentar un mejor desempeño en crecimiento en comparación con aquellos con copas de menor tamaño, observó que el tamaño de la copa aumentó significativamente a medida que aumentaba la clase diamétrica.

Por otro lado, la distribución del PC sugiere que, a mayor tercil, la variabilidad dentro de cada tratamiento disminuye, indicando una mayor uniformidad en las dimensiones de las copas de los árboles a medida que aumenta el DAP. De acuerdo con [155] la diferencia de desarrollo del DAP entre los diferentes espaciamientos se puede explicar por la variación en el tamaño de la copa y ésta se relaciona con la densidad de la plantación de la misma manera que el diámetro.

En cuanto a la evaluación de la relación del dc con el DAP, se observó que existe correlación entre las variables, resultado similar al obtenido por dos autores citados por [156] en árboles de un bosque de Nigeria, aunque afirman que no se puede atribuir la variación en el crecimiento individual de árboles solamente al diámetro o altura de copa. Aun así, según lo describe ese autor, esta relación afecta el crecimiento del árbol y es parcialmente definida por el espaciamiento. Estas variables suelen estar bien relacionadas, puesto que el DAP es un indicador del tamaño y desarrollo del árbol, que a su vez influye en el diámetro de la copa [124]. En general, para *Eucalyptus* es importante determinar el índice de espaciamiento que necesitan porque no toleran que las copas se superpongan ya que produce una reducción del crecimiento. Estudios han reportado una razón de dc/DAP de 18 para varias especies de *Eucalyptus*, donde para *E. grandis* específicamente se ha establecido un rango natural de 17 a 26, del cual la parte inferior corresponde a árboles grandes (60 cm de DAP) [156]. De forma general, nuestros datos reportan una relación promedio de 31,3 para árboles con promedio de 13,8 cm de DAP y esta relación decrece a medida que aumenta el tercil, es decir, a medida que aumenta el DAP lo que es coherente con lo reportado en la bibliografía. Este valor puede ser importante para estudios de biomasa, competencia por recursos o diseño de SSP.

En este estudio, si bien la disponibilidad de espacio fue igual para ambos tratamientos ya que todos fueron plantados con un espaciamiento de 5 x 5 m, se diferencian en el diseño ya que en el

tratamiento 2F ambas filas son “borde” pero en 4F hay dos filas de borde y dos centrales. Este efecto “borde/centro” no fue analizado en este estudio, por lo que no se le puede atribuir las diferencias al mismo. Por lo tanto, la dimensión de la copa podría estar influenciada naturalmente por la adaptación a las características del sitio y por la genética. En este sentido, la variabilidad observada en la conformación de la copa de la plantación está determinada por las diferentes condiciones a las que se exponen las plantas, como las pequeñas diferencias en la exposición al sol, los vientos y la pendiente, factores que establecen variaciones en el anclaje y la disponibilidad de humedad alrededor del tronco [157].

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten concluir que, a edades tempranas de la plantación silvopastoril evaluada, la densidad arbórea no provocó efectos en el crecimiento individual de los árboles y que la misma aún no ha generado una competencia intraindividual lo suficientemente intensa como para afectar las variables dendrométricas de fuste y copa y causar así diferencias entre tratamientos. A pesar de que la mayoría de las variables de copa no mostraron diferencias, los árboles con mayores diámetros en la plantación más densa presentaron mayores valores promedios de la variable diámetro de copa, seguramente dada la variabilidad genética del material seminal o con adaptaciones tempranas a las condiciones específicas del sitio y tratamiento, sin implicar necesariamente una ventaja competitiva a largo plazo. Sin embargo, se detectaron cambios a nivel de la plantación, tanto en área basal como en volumen total a los 3,6 años, atribuible a la mayor cantidad de individuos por unidad de superficie en el tratamiento de mayor densidad. Estos resultados destacan la necesidad e importancia de considerar el factor tiempo para la evaluación de la densidad sobre el desarrollo y crecimiento de los árboles en SSP y para ello la planificación de inventarios forestales anuales que permitan identificar y conocer los cambios y la evolución de las variables individuales y de la plantación como un todo.

7. PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se sugiere continuar con las mediciones anuales de variables de fuste y de copa, con el objetivo principal de conocer la evolución del crecimiento de los árboles y detectar posibles diferencias entre los tratamientos en las distintas etapas de desarrollo de la plantación. Además, es necesario incluir mediciones y estimaciones de factores de forma específicos para distintos diseños silvopastoriles y para distintas edades. Estos factores permitirán obtener volúmenes reales de madera, permitiendo así aumentar la precisión en las predicciones y proyecciones. En cuanto a las variables de copa, existe la necesidad de continuar el estudio de las distintas relaciones morfométricas para comprender la dinámica del dosel, como así también, incluir el impacto en el desarrollo de los árboles referidos a la posición de estos dentro de la plantación (borde o centro), dado que el tamaño de la copa muestra una relación directa con la calidad del sitio, reflejando diferencias en el crecimiento entre sitios favorables y menos productivos. Se sugiere integrar el análisis del mapeo de electroconductividad de suelos disponible en la plataforma experimental para identificar patrones de respuesta de los árboles en función de la heterogeneidad del sitio, permitiendo comprender mejor la influencia de las condiciones edáficas sobre el desarrollo de la plantación.

8. REFERENCIAS

- [1] Uruguay XXI, *Sector Forestal en Uruguay*. 2023 [En línea]. Disponible en: www.uruguayxxi.gub.uy. [Accedido: 6 de octubre de 2024]
- [2] M. Casella A., A. Cedres G, C. Munka M., V. Pastorini C., y J. Posse B., *Diagnóstico de sistemas agroforestales del Uruguay*, Universidad de la República, Montevideo, 1993.
- [3] V. Pastorini et.al., *Estudio de los factores que explican la adopción de tecnologías que apuntan a la inclusión del rubro forestal en predios ganaderos*, Montevideo, 2011.
- [4] C. Viñoles, J. Fedrigo, V. Benítez, R. Santa Cruz, y J. Posse, “I Seminario en Sistemas Silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad”, en *Estado actual de la investigación en Sistemas Silvopastoriles en Uruguay*, Melo, Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria INIA, pp. 3-23, 2017.
- [5] A. Bussoni y M. Boscana, “Actas IV Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles”, en *Sistemas Silvopastoriles en Uruguay: Análisis económico-financiero y la propuesta del índice leer*, Neuquén, Argentina: INTA, pp. 375-387, 2018.
- [6] T. Kamel de Oliveira, *Sistema agrossilvipastoril com Eucalipto e Braquiária sob diferentes arranjos estruturais em área de Cerrado*, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 2005.
- [7] A. Pachas, L. Colcombet, M. Correa, y H. Henning, *Producción forrajera de Axonopus catarinensis Valls bajo diferentes densidades de Eucalyptus grandis en sistemas silvopastoriles*, 2018.
- [8] A. Bussoni, F. Cubbage, y J. Alvarez Giambruno, “Silvopastoral systems and multi-criteria optimization for compatible economic and environmental outcomes”, *Agric Syst*, pp. 103-118, 2021, doi: 10.1016/J.AGSY.2021.103118. [Accedido: 15 de febrero de 2024]
- [9] S. N. de Oliveira Neto, A. B. do Vale, A. de Padúa, M. Barbosa, y J. Batuira de Assis, *Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta*, 1.ª ed. Viçosa, Minas Gerais: Sociedade de Investigações Florestais, 2010.
- [10] T. Ammour, A. López, M. Scheelje, H. Andrade, Y. Ordoñez, y A. Schlönvoigt, *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica*, 1.ª ed. Turriabla, CR: CATIE, 2012 [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/281235377>. [Accedido: 1 de octubre de 2023]
- [11] J. Fedrigo et.al., “Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay”, *Veterinaria*, vol. 54, n.º 209, pp. 26-41, 2018, doi: 10.29155/vet.54.209.4. [Accedido: 1 de octubre de 2024]
- [12] L. Gallo, “Sistemas Silvopastoriles”, *Pasturas*, Plan Agropecuario, pp. 30-35, 2006.
- [13] J. Imaña-Encinas, *Mensura Dasométrica*, 2011.

- [14] R. Russo, “Reflexiones sobre los sistemas Silvopastoriles”, *Pastos y Forrajes*, vol. 38, n°2, pp. 157-161, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/280882277>. [Accedido: 1 de octubre de 2023]
- [15] J. Rivera et al., “Sistemas Silvopastoriles: Hacia una diversificación sostenible”, en *Efecto de la sombra de un rodal de Eucalyptus en verano, sobre el comportamiento y el peso de terneros al destete en un sistema de cría bovina en el norte de Buenos Aires*, Montevideo, Uruguay, pp. 278-282, 2023.
- [16] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Parlamento del Uruguay, (28, dic. de 1987), *Ley N° 15939 - Segunda Ley Forestal*, Diario Oficial, Uruguay [En línea]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>. [Accedido: 11 de junio de 2024]
- [17] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Forestal General, *Cartografía Nacional Forestal 2021*, 2021.
- [18] Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social (CERES), *La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible*, 2023.
- [19] L. Boragno, *Superficie Forestal del Uruguay (Bosques Plantados)*, Montevideo, Uruguay, 2022.
- [20] F. Aliall Silva, *Clasificación de suelos por aptitud de uso*, 2020.
- [21] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, *Suelos de prioridad forestal: Artículo 5*, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/suelos-prioridad-forestal>. [Accedido: 11 de agosto de 2024]
- [22] Ministerio de Industria Energía y Minería, (06, jul. de 1988), *Decreto 452/988 Reglamentación de la Ley forestal n° 15.939*, MIEM [En línea]. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/institucional/normativa/decreto-452988-reglamentacion-ley-forestal-n-15939>. [Accedido: 11 de febrero de 2025]
- [23] Oficina de Programación y Política Agropecuaria OPYPA, *Análisis sectorial y cadenas productivas*, 2016 [En línea]. Disponible en: https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202016/anuario_opypa_2016_en_baja.pdf. [Accedido: 7 de diciembre de 2024]
- [24] Uruguay XXI, *Empresas forestales del mundo eligen Uruguay*. [En línea]. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/empresas-forestales-del-mundo-eligen-uruguay/>. [Accedido: 11 de agosto de 2024]
- [25] D. Martin, *La actividad forestal a través del censo agropecuario*, 2003.
- [26] Uruguay XXI, *Sector Forestal en Uruguay*, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>. [Accedido: 29 de octubre de 2024]
- [27] M. Boscana, *Vigésima encuesta de viveros forestales*, Montevideo, 2020.

- [28] C. A. Brussa, *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuentes en Uruguay y regiones de clima templado*. Montevideo, Uruguay, 1994.
- [29] P. G. Cannon, *Grandis: Eucalyptus grandis Hill ex Maid, Especie de árbol de uso múltiple en América Central*, Turriabla, CR, 1994.
- [30] J. F. Peña Ramos y E. Sánchez Gullón, *Nuevas aportaciones al conocimiento de las especies de eucaliptos cultivados en Huelva*, 2022.
- [31] M. Aguerre et al., *Manual para productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina*, 1995.
- [32] G. Oberschelp, *Enraizamiento en dos clones de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden utilizando técnicas de macro-cutting, mini-cutting y micro-cutting*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA, 2008. doi: 10.13140/RG.2.1.2413.6722.
- [33] G. Balmelli y F. Resquin, *Productividad de diferentes especies de Eucalyptus sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera*, Tacuarembó, 2006.
- [34] Z. Bennadji, *Principales características socio-económicas de los sistemas de producción forestal sobre areniscas de Tacuarembó y Rivera*, Tacuarembó, 2001.
- [35] G. Balmelli, *Mejoramiento genético de Eucalyptus grandis: resultados en zona 8*, Programa Nacional Forestal-INIA, Tacuarembó, 2002.
- [36] G. Balmelli y F. Resquin, *Evaluación de especies de Eucalyptus al 5to año*, INIA Tacuarembó, 2000.
- [37] E. Perrotti, *Sistema Silvopastoril con clones de Eucalyptus grandis*, Universidad Nacional del Nordeste UNNE, 2017.
- [38] C. Faroppa, P. Escudero, y G. Martínez, “Sistemas Silvopastoriles: Hacia una diversificación sostenible”, en *Sistemas Silvopastoriles en Uruguay, una visión institucional*, Montevideo: CIPAV, 2023, pp. 1089-1095.
- [39] Uruguay XXI, *Informe anual comercio exterior: Celulosa se destaca como producto de exportación*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-anual-de-comercio-exterior-de-uruguay-2023/>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024]
- [40] H. Bueno, P. Bobadilla, y S. Huertas, “Silvopastoreo: Una opción productiva sostenible”, *Plan Agropecuario*, pp. 32-34, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/181_2787.pdf. [Accedido: 9 de noviembre 2024]
- [41] J. Soares de Lima y R. Scoz, “I Seminario en Sistemas Silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad”, en *Aportes de INIA a la construcción de sistemas de producción integrados*, Melo, Uruguay: INIA, 2017, pp. 24-34.
- [42] C. Viñoles, J. Fedrigo, V. Benítez, y R. Santa Cruz, *La consolidación de la generación de conocimiento y difusión de los Sistemas Silvopastoriles en Uruguay*, 2021.

- [43] C. Mantero y V. Morales, *I Seminario en Sistemas Silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad*, Melo, Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2017.
- [44] J. Fedrigo et al., *Understanding the changes induced by the incorporation of trees in low densities into livestock systems: relevance of a long-term interdisciplinary experimental platform*, *Research Square*, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-3911569/v1.
- [45] L. Sancho, *Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay*, 2021.
- [46] S. Benedetti y N. Espinoza, “Sistemas Agroforestales”, *Ciencia e Investigación Forestal*, vol. 6, n°2, pp. 281-293, 1992.
- [47] A. Sotomayor, I. Moya, y O. Teuber, *Manual de Establecimiento y Manejo de Sistemas Silvopastoriles en Zonas Patagónicas de Chile*, 41.ª ed. INFOR, 2009. [En línea]. Disponible en: www.infor.cl. [Accedido: 20 de noviembre de 2024]
- [48] L. Babbar, *Prácticas agroforestales: Aspectos ecológicos de la agroforestería*, Turrialba, CR, 1983.
- [49] M. Megías, P. Molist, y M. Pombal, *Tejidos vegetales. Meristemas Atlas de Histología Vegetal y Animal*, Facultad de Biología, Universidad de Vigo. [En línea]. Disponible en: https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guizada_v_meristemas.php. [Accedido: 12 de octubre de 2024]
- [50] D. Wilkin y J. Brainard, *Plant Growth*, CK-12 Foundation, Ed., California, Estados Unidos, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-biology-flexbook-2.0/section/9.13/primary/lesson/plant-growth-bio/>. [Accedido: 12 de mayo de 2025]
- [51] Polyfarming, “Crecimiento del árbol y desarrollo de la copa”, *Los diferentes componentes del ecosistemas/El bosque*, 2020. [En línea]. Disponible en: https://polyfarming.eu/wp-content/uploads/2020/07/Ficha-bosque-n%C2%BA4_Crecimiento-y-desarrollo-de-la-copa.pdf [Accedido: 20 de noviembre de 2024]
- [52] M. E. Schomaker, S. J. Zarnoch, W. A. Bechtold, D. J. Latelle, W. G. Burkman, y S. M. Cox, *Crown-Condition Classification: A Guide to Data Collection and Analysis*, Estados Unidos, 2007.
- [53] M. E. Fernández, J. Gyenge, y T. Schlichter, *Una nueva alternativa de producción en la Patagonia: Desarrollo de Sistemas Silvopastoriles basados en Coníferas Exóticas*, Bariloche, Río Negro, 2006.
- [54] A. I. Antón Piquero y C. Sans, *Alternativas de Uso Múltiple Forestal en Uruguay*, Universidad de la República, Montevideo, 2007 [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/xii/0677-b4.htm> [Accedido: 12 de mayo de 2025]

- [55] R. Díaz, M. Jaurena, y W. Ayala, “Impacto de la intensificación productiva sobre el campo natural en Uruguay”, *Revista INIA*, n° 14 Pasturas, pp. 16-21, 2008.
- [56] J. Lapetina, *Guía de buenas prácticas ganaderas para el manejo y conservación de pastizales naturales en áreas protegidas: Quebradas del Norte*, vol. 1. MVOTMA, SNAP, 2012. [En línea]. Disponible en: https://medios.presidencia.gub.uy/jm_portal/2012/noticias/NO_G539/guia_de_pasturas_snap.pdf. [Accedido: 1 de diciembre de 2024]
- [57] M. Jaurena, D. Formoso, y R. M. Gómez Miller, «Campo natural: Patrimonio del país y fundamento de la estabilidad productiva de la ganadería», *Revista Trimestral INIA*, vol. 32, pp. 31-35, 2013.
- [58] G. A. Goncherenko et al., “Silvopastoral systems as a strategy to attenuate the negative effects of heat stress on productivity of beef cows grazing natural grassland”, *Agroforestry Systems*, vol. 98, pp. 1995-2011, 2024, doi: 10.1007/s10457-024-01081-9. [Accedido: 4 de diciembre de 2024]
- [59] S. Baeza, F. Gallego, F. Lezama, A. Altesor, y J. Paruelo, “Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas”, en *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*, FPTA-INIA, 2010, 2, pp. 33-54.
- [60] J. Perez Rocha, *El estado del campo natural en el Uruguay*. FAO, 2020. doi: 10.4060/cb0989es.
- [61] M. F. García Rodríguez y F. Sorrenti Braga, *Producción estivo-otoñal de un campo natural del noreste sometido a niveles crecientes de sombra*, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2022.
- [62] E. J. Berretta, *Producción de pasturas naturales en el basalto*, Tacuarembó, 1997.
- [63] M. Gómez Mazzei, J. M. Mora Gavarone, y L. A. Moreira Machado, *Respuesta a la intensificación productiva del campo natural en el período otoñal-invernal*, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2023.
- [64] E. J. Berretta, D. Risso, F. Montossi, y G. Pigurina, “Grassland ecophysiology and grazing ecology”, en *Campos in Uruguay*, G. Lemaire, J. Hodgson, A. de Moraes, C. Nabinger, y P. Carvalho, Eds., Tacuarembó, Uruguay: CABI, 2000, pp. 377-394.
- [65] E. J. Berretta, *Campo Natural: valor nutritivo y manejo*, INIA, Tacuarembó, pp. 113-127, 1996.
- [66] B. Rosengurtt, *Tablas de comportamiento de las especies de plantas de campos naturales en el Uruguay*, 1979.
- [67] F. Montossi, R. San Julián, D. de Maltos, E. J. Berretta, W. Zamit, y J. Levratto, *Alimentación de la oveja de cría durante el último tercio de gestación con campo natural y mejoramientos extensivos*, 1997.
- [68] R. Santiago Barro, Respostas morfofisiológicas e produtivas de genótipos forrageiros nativos em diferentes condições de luminosidade, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto

- Alegre (RS), Brasil, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/321769475>. [Accedido: 27 de abril de 2025]
- [69] C. A. Carranza y M. Ledesma, *Bases para el manejo de sistemas silvopastoriles*, Buenos Aires, Argentina, 2009.
- [70] S. M. Lacorte y J. I. Esquivel, “1er Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles”, en *Sistemas silvopastoriles en la Mesopotamia Argentina. Reseña del conocimiento, desarrollo y grado de adopción*, 2009.
- [71] R. Zarza, J. Millot, M. Bemhaja, y M. Cadenazzi, *Efectos de la sombra sobre la composición botánica de pasturas naturales en areniscas*, 2006.
- [72] Uruguay XXI, *Informe Sectorial Agronegocios*, 2020.
- [73] C. Balian, *Informe de análisis costo-beneficio y potencial de mitigación de medidas de mitigación priorizadas*, 2023.
- [74] Uruguay XXI, *Sector Ganadero en Uruguay*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-sector-ganadero-2024/>. [Accedido: 1 de diciembre de 2024]
- [75] Instituto Nacional de Carnes, *Sector cárnico Uruguayo*, 2022.
- [76] T. Chamyan y V. López, *Evaluación económica y ambiental de un sistema silvopastoril de Eucalyptus dunnii para obtención de trozas de diámetros finos en baja densidad*, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2024.
- [77] F. Montossi y F. Cazulli, *Avances en la construcción de un modelo de intensificación sostenible de la ganadería del Uruguay*, Uruguay, 2015.
- [78] F. Montossi y F. Cazzuli, *Beef marketing and quality in Uruguay*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/337771774>. [Accedido: 29 de noviembre de 2024]
- [79] F. Montossi, M. Font-i-Furnols, M. del Campo, R. San Julián, G. Brito, y C. Sañudo, “Sustainable sheep production and consumer preference trends: Compatibilities, contradictions, and unresolved dilemmas”, *Meat Sci*, vol. 95, n.º 4, pp. 772-789, dic. 2013, doi: 10.1016/j.meatsci.2013.04.048.
- [80] A. Navas Panadero, “Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical”, *Revista de Medicina Veterinaria*, vol. 19, pp. 113-122, 2010.
- [81] R. T. Cowan, R. J. Moss, y D. V Kerr, “Summer feeding systems”, *Tropical Grassland*, vol. 27, Queensland, Australia, 1993, pp. 150-161.
- [82] C. Hepp K, *Efectos de las condiciones ambientales sobre el desempeño productivo de los bovinos de carne*, Chile, 2023.
- [83] R. A. Arias, T. L. Mader, y P. C. Escobar, *Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche*, Temuco, Chile, 2008.

- [84] A. Navas Panadero, “Sistemas silvopastoriles para el diseño de fincas ganaderas sostenibles”, *Revista ACOVEZ*, vol. 16, 2007. [En línea]. Disponible en: www.produccion-animal.com.ar. [Accedido: 16 de noviembre de 2024]
- [85] D. Pezo y M. Ibrahim, *Sistemas silvopastoriles*, vol. 40, n°2. Turrialba, CR: CATIE, 1998.
- [86] S. M. Lacorte et al., “Efecto del pastoreo en el crecimiento de *Grevillea robusta* A. Cunn. y la dinámica del pastizal en Misiones, Argentina”, *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, RIA, INTA, vol. 32, n°2, Buenos Aires, Argentina, pp. 79-95, 2003.
- [87] S. M. Lacorte et al., “1er Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles”, en *Análisis de un Sistema Silvopastoril en el sur de Misiones*, Argentina. Producción forestal, forrajera y de carne. Estudio de Caso., Posadas, Misiones: Sitio Argentino de Producción Animal, 2009.
- [88] D. J. Mead, “1er Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles”, en *Biophysical interactions in silvopastoral systems: a New Zealand perspective*, Golden Bay, New Zealand, 2009.
- [89] V. Vázquez-Presedo, *Naturaleza, formas y límites de la competencia*, 1999.
- [90] C. H. Lin, M. L. McGraw, M. F. George, y H. E. Garrett, “Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential”, *Agroforestry Systems*, vol. 53, n.º 3, pp. 269-281, 2001, doi: 10.1023/A:1013323409839.
- [91] K. Hikosaka y I. Terashima, *A model of the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use*, 1995.
- [92] H. An y Z. P. Shangguan, “Specific leaf area, leaf nitrogen content, and photosynthetic acclimation of *Trifolium repens* L. seedlings grown at different irradiances and nitrogen concentrations”, *Photosynthetica*, vol. 46, n.º 1, pp. 143-147, mar. 2008, doi: 10.1007/s11099-008-0023-y.
- [93] D. Meziane y B. Shipley, “Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: Effects of irradiance and nutrient availability”, *Plant Cell Environ*, vol. 22, n.º 5, pp. 447-459, 1999, doi: 10.1046/j.1365-3040.1999.00423.x.
- [94] V. Gargaglione, P. L. Peri, J. P. Mayo, y R. Christiansen, “Sistemas silvopastoriles Hacia una diversificación sostenible”, en *Evaluación especies forrajeras como alternativa para incrementar la producción en sistemas silvopastoriles de ñire. Parte II: calidad del sotobosque vs. Especies implantadas*, Montevideo: CIPAV, 2023, pp. 884-894.
- [95] E. Guerra Bugueño, F. Célis Mosqueira, y N. Moreno García, “Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*”, *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 20, n.º 1, pp. 21-31, 2013, doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.08.051.
- [96] W. M. Magalhães, R. L. Grisi Macedo, N. Venturin, E. Manuabu Higashikawa, y M. Yoshitani Júnior, “Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais”, *Cerne*, vol. 13, n°4, pp. 368-375, 2007.

- [97] E. García, Á. Sotomayor, S. Silva, y G. Valdebenito, *Establecimiento de plantaciones forestales, Eucalyptus sp.* Instituto Forestal, 2000.
- [98] J. Ruiz García, *La producción forestal, de la celulosa y el papel y sus repercusiones sobre la cuenca hidrográfica del Río Bio-Bio*, Concepción, Chile, 2008.
doi:10.13140/RG.2.1.1693.7362.
- [99] J. Hernández, *Utilización de biomasa forestal con fines energéticos: consecuencias de la exportación de nutrientes*, Montevideo, Uruguay, 2013.
- [100] Esnacifor, *Importancia de la poda en el manejo de plantaciones forestales*, 2002. [En línea]. Disponible en:
[https://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD%2022%2099/pd22-99-p1-3%20rev2\(F\)%20s.pdf](https://www.itto.int/files/user/pdf/publications/PD%2022%2099/pd22-99-p1-3%20rev2(F)%20s.pdf). [Accedido: 18 de noviembre de 2024]
- [101] Esnacifor, *Manejo de Plantaciones Forestales*. [En línea]. Disponible en:
<https://es.scribd.com/document/56034703/Cartilla-Proecen-PDF> [Accedido: 10 de diciembre de 2024]
- [102] M. Angulo y K. Rivas, *Efecto del manejo silvicultural en el crecimiento y productividad de plantaciones de Pinus caribaea var. hondurensis en Maderas del Orinoco*, Edo. Monagas, Mérida, Venezuela, 2018.
- [103] W. Massote Magalhães, R. L. Grizi Macedo, N. Venturim, E. Manabu Higashikawa, y M. Yoshitani Júnior, *Desempenho silvicultural de espécies de Eucalyptus spp. em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais*, Floresta e Ambiente, vol. 12, n.º 2, 2005.
- [104] F. J. Caniza, *Efecto de los estados de competencia post-raleo en los caracteres de importancia de la madera del Eucalyptus grandis Hill ex Maiden para uso sólido*, Universidad Nacional de Misiones, Misiones, Argentina, 2010.
- [105] A. S. Rensi Coelho, H. A. Mello, y J. W. Simões, *Comportamento de espécies de Eucaliptos face ao espaçamento*, São Paulo, Brasil, 1970.
- [106] F. Patiño Valera, *Variación genética em progênies de Eucalyptus saligna Smith e sua interação com o espaçamento*, Universidad de Sao Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 1986.
- [107] A. L. Bernardo, *Crecimiento e eficiência nutricional de Eucalyptus spp sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais*, Universidad Federal de Viçosa, 1995.
- [108] J. C. Pinilla, “Manejo y rendimiento de plantaciones”, en Chile: INFOR, 1995, vol. 5, pp. 41-102.
- [109] T. K. de Oliveira, R. L. Grisi Macedo, N. Venturin, y E. Manabu Higashikawa, “Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril”, *Pesqui Florest Bras*, vol. 0, n.º 60, feb. 2009, doi: 10.4336/2009.pfb.60.01.
- [110] S. N. de Oliveira Neto, G. Gonçalves dos Reis, M. das G. Ferreira Reis, y J. C. Lima Neves, “Produção e distribuição de biomassa em Eucalyptus camaldulensis Dehn. em resposta á

adubação e ao espaçamento”, *Revista Árvore*, vol. 27, n°1, Viçosa, Minas Gerais, pp. 15-23, 2003.

- [111] A. de Moura Zanine y E. Santos, *Competição entre espécies de plantas – Uma revisão*, 2004.
- [112] O. Murillo, “Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica”, *Agronomía Costarricense*, vol. 24, n.º 4, pp. 41-47, 2000, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43624204>. [Accedido: 15 de diciembre de 2024]
- [113] M. Rodríguez Arellano, M. Mendoza Briseño, C. Avila Bello, y J. Pacheco Velazco, “Ocupación por árboles de calidad: un concepto para evaluar plantaciones”, *Madera y Bosques*, vol. 5, n°1, pp. 43-51, 1999.
- [114] J. E. Bergez, M. Etienne, y P. Balandier, “ALWAYS: a plot-based silvopastoral system model”, *Ecol Modell*, vol. 115, n.º 1, pp. 1-17, feb. 1999, doi: 10.1016/S0304-3800(98)00153-7.
- [115] C. K. Ong, J. E. Corlett, R. P. Singh, y C. R. Black, “Above and below ground interactions in agroforestry systems”, *For Ecol Manage*, vol. 45, n.º 1-4, pp. 45-57, nov. 1991, doi: 10.1016/0378-1127(91)90205-A.
- [116] P. K. Ramachandran Nair, *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry, 1993.
- [117] P. L. Peri, *Leaf and canopy photosynthesis models for cocksfoot (Dactylis glomerata L.) grown in a silvopastoral system*, Universidad Lincoln, Canterbury, New Zeland, 2002.
- [118] C. Dupraz, *Tree-crops interaction models: State of the Art Report*, 2002.
- [119] H. E. Fassola, S. M. Lacorte, A. N. Pachas, y R. Pezzuti, “Factores que influncian la producción de biomasa forrajera de Axonopus jesuiticus Valls, bajo el dosel de Pinus taeda L. en el nordeste de Corrientes”, *Revista de Investigaciones Agropecuarias, RIA, INTA*, vol. 34, n°2, Buenos Aires, Argentina, pp. 21-38, 2005.
- [120] A. R. Sibbald, J. H. Griffiths, y D. A. Elston, “Herbage yield in agroforestry systems as a function of easily measured attributes of the tree canopy”, *For Ecol Manage*, vol. 65, n.º 2-3, pp. 195-200, jun. 1994, doi: 10.1016/0378-1127(94)90170-8.
- [121] M. A. Durlo y L. Denardi, “Morfometría de Cabralea canjerana, em mata secundaria nativa do Rio Grande do Sul”, *Ciência Florestal*, vol. 8, n.º 1, pp. 55-66, 1998.
- [122] J. Angulo Urquia, *Relación entre el diámetro de copa y del fuste de Cedrelinga cateniformis (Ducke) Ducke, en la zona de Atalaya*, Región Ucayali, Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía, Yarinacocha, Perú, 2015.
- [123] R. Rodríguez Laguna, S. Valencia Manzo, J. Meza Rangel, M. Á. Capó Arteaga, y A. Reynoso Pérez, “Crecimiento y características de la copa de procedencias de Pinus greggii Engelm. en Galeana, Nuevo León”, *Revista Fitotec. Mex*, vol. 31, n.º 1, pp. 19-26, 2008.
- [124] D. Arias, “Morfometría del árbol en plantaciones forestales tropicales”, *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, vol. 2, n.º 5, 2005.

- [125] L. L. Pierce y S. W. Running, “Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer”, *Ecology*, vol. 69, n.º 6, pp. 1762-1767, 1988, doi: 10.2307/1941154.
- [126] H. Fassola, P. Ferrere, S. Lacorte, y F. Rodríguez, “Predicción de la producción de un pastizal bajo distintas estructuras de canopia de *Pinus taeda* L. en el Noreste de Corrientes, Argentina”, *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, vol. 31, n.º 2, pp. 73-96, 2002.
- [127] O. García, *Growth of thinned and pruned stands*, Rotorua, Nueva Zelanda, 1990. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/238822957>. [Accedido: 16 de diciembre de 2024]
- [128] A. Altaminino, H. da Silva, A. Echevarría, D. Panario, y R. Puentes, *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo I*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes, 1976.
- [129] MGAP, “Descripción de Grupos de Suelos CO.N.E.A.T.”, *Política y Gestión*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat> [Accedido: 18 de abril de 2024]
- [130] M. Prodan, R. Peters, F. Cox, y P. Real, *Mensura Forestal*. San José, CR: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 1997.
- [131] R Core Team, *A language and environment for statistical computing*, Vienna, Austria, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.r-project.org/> [Accedido: 9 de julio de 2024].
- [132] P. C. R. Assis, L. F. Stone, J. C. Medeiros, B. E. Madari, J. de M. Oliveira, y F. J. Wruck, “Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 19, n.º 4, pp. 309-316, 2015, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316.
- [133] V. Resende Castro, P. G. Surdi, M. Tomazello Filho, G. Chaix, y J. P. Laclau, “Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio no crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis*”, *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, vol. 45, n.º 113, pp. 89-99, mar. 2017, doi: 10.18671/scifor.v45n113.08.
- [134] R. R. Paula et al., “Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements”, *Agroforestry Systems*, vol. 87, n.º 6, pp. 1295-1307, dic. 2013, doi: 10.1007/s10457-013-9638-5.
- [135] F. Lopes Ramos de Oliveira et al., “Crescimento inicial Eucalipto e Acácia, em diferentes arranjos de integração de lavoura-pecuária-floresta”, *Cerne*, vol. 21, n.º 2, pp. 227-233, abr. 2015, doi: 10.1590/01047760201521021489.
- [136] H. Tonini, M. Moura Morales, V. Porfirio da Silva, J. Lulu, y A. Lopes de Freitas Neto, “Efeito do sistema de plantio e da exposição solar sobre a alocação da biomassa no desenvolvimento

inicial do eucalipto”, *Ciencia Florestal*, vol. 29, n.º 1, pp. 86-95, ene. 2019, doi: 10.5902/1980509817808.

- [137] Á. Sotomayor, I. Moya, y B. Acuña, *Comportamiento de las variables dasométricas en plantaciones de Pinus contorta Dougl. Ex Loud., bajo manejo silvopastoral y forestal en la región de Aysén*, Chile, 2010.
- [138] Y. Saiter Ribeiro, D. E. Vera, R. Giolo de Almeida, y V. A. Laura, “Desempenho Silvicultural em Sistema Silvopastoril do Clone H13 de Eucalyptus urograndis em Diferentes Densidades aos 12 Anos”, *UNICIÊNCIAS*, vol. 24, n.º 1, pp. 45-50, feb. 2020, doi: 10.17921/1415-5141.2020v24n1p45-50.
- [139] E. Vieira Rondon, “PRODUÇÃO DE BIOMASSA E CRESCIMENTO DE ÁRVORES DE Schizolobium amazonicum (Huber) Ducke SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS NA REGIÃO DE MATA”, *Revista Árvore*, vol. 26, n.º5, Viscosa, Brasil, pp. 573-576, 2002.
- [140] J. Ribaski, R. Dedecek, V. Mattei, C. Flores, A. Vargas, y S. Ribaski, *Sistemas Silvopastoris: Estratégias para o Desenvolvimento Rural Sustentável para a Metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul*, Colombo, PR, 2005.
- [141] C. A. Mastrandrea, M. Flores, y M. de los Á. García, “Rentabilidad de diferentes manejos de Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden) en Entre Ríos (Argentina) según esquemas de comercialización de trozas”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)*, vol. 11, n.º27, 2014.
- [142] F. Resquin, K. Baez, S. De Freitas, D. Passarella, A. P. Coelho-Duarte, y C. Rachid-Casnati, *Impact of Thinning on the Yield and Quality of Eucalyptus grandis Wood at Harvest Time in Uruguay*, vol. 15, 2024, doi: 10.3390/xxxxx.
- [143] D. Alves Ferreira, P. dos Santos Leles, E. Cabrera Machado, A. Marques de Abreu, y F. Abilio, “Crescimento de clone de Eucalyptus urophylla x E. grandis em diferentes espaçamentos”, *Floresta*, vol. 44, n.º3, pp. 431-440, 2014.
- [144] M. Jerez, M. Rubio, A. Quevedo, C. Jerez, M. Quintero, y L. Vincent, “Simulador de base individual espacialmente explícito para Plantaciones forestales Spatially explicit individual-based simulator for forest plantations”, *Ciencia e Ingeniería*, vol. 39, n.º3, pp. 259-268, sep. 2018, [En línea]. Disponible en: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/12989> [Accedido: 12 de mayo de 2025]
- [145] A. Pommerening y A. J. Sánchez Meador, “Tamm review: Tree interactions between myth and reality”, *For Ecol Manage*, vol. 424, pp. 164-176, sep. 2018, doi: 10.1016/J.FORECO.2018.04.051.
- [146] M. Jerez, L. Vincent, y A. Moret, “Un modelo de competencia para las plantaciones de Teca del área experimental de la Reserva Forestal Caparo (Barinas-Venezuela)”, *Revista Forestal Venezolana*, vol. 43, n.º2, pp. 157-171, 1999. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/237395806>. [Accedido: 13 de diciembre de 2024]

- [147] C. Rachid Casnati, F. Resquín, y A. Hirigoyen, “Introducción al uso del Índice de Densidad Relativa para el manejo poblacional de plantaciones de pinos y eucaliptos para usos sólidos”, *Revista INIA, Sistema Forestal*, pp. 117-120, 2022.
- [148] J. M. Pacheco, *Influência do espaçamento no crescimento de Pinus taeda L. na região centro-sul do Paraná*, Universidad Estatal del Centro-Oeste, Irati, PR, 2013.
- [149] R. Wimmer, G. Downes, R. Evans, y J. French, “Effects of site on fibre, kraft pulp and handsheet properties of Eucalyptus globulus”, *Ann For Sci*, vol. 65, nº 6, pp. 602-602, 2008, doi: 10.1051/forest:2008039.
- [150] H. Pretzsch, “Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures”, *For Ecol Manage*, vol. 327, pp. 251-264, 2014, doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.027.
- [151] H. Pretzsch et al., “Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests”, *Urban For Urban Green*, vol. 14, nº 3, pp. 466-479, 2015, doi: 10.1016/j.ufug.2015.04.006.
- [152] A. B. Cisneros, J. G. Moglia, y J. A. Álvarez, “Morphometry of crown in prosopis alba griseb”, *Ciencia Florestal*, vol. 29, nº 2, pp. 863-884, jun. 2019, doi: 10.5902/1980509826846.
- [153] Bender A; Araujo J; Perreta M; Moglia J, “Magnitudes dendrométricas de cuatro poblaciones de Algarrobo Blanco (Prosopis alba Griseb.) de diferentes edades”, *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, vol. 14, nº 1, Santa Fe, Argentina, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-77192015000100002 [Accedido: 12 de mayo de 2025.]
- [154] P. Y. A. P. Wirabuana et al., “The growth, aboveground biomass, crown development, and leaf characteristics of three Eucalyptus species at initial stage of planting in Jepara, Indonesia”, *Biodiversitas*, vol. 22, nº 5, pp. 2859-2869, may 2021, doi: 10.13057/biodiv/d220550.
- [155] W. R. Harms y A. B. Collins, *Spacing and twelve-year growth of Slash Pine*, 1965.
- [156] F. H. Wadsworth, *Producción Forestal para América Tropical*, 2000.
- [157] C. Herrero de Aza y F. Bravo-Oviedo, “Validación de un modelo de tamaño de copa de Pinus sylvestris L. en bosques del sistema central”, *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, vol. 23, Madrid, España, pp. 193-198, 2007.

9. ANEXO

Tabla 14. Supuestos del modelo lineal: Test de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad de varianzas (prueba de Levene)

Supuestos Modelo Lineal		
Variables	p-valor Shapiro	p-valor Levene
DAP 2,5	0,739	0,222
DAP 3,6	0,728	0,281
ht 2,5	0,651	0,320
ht 3,6	0,316	0,467
g 2,5	0,727	0,202
g 3,6	0,674	0,284
AB 2,5	0,736	0,237
AB 3,6	0,736	0,401
v 2,5	0,712	0,208
v 3,6	0,323	0,329
V 2,5	0,728	0,265
V 3,6	0,189	0,453

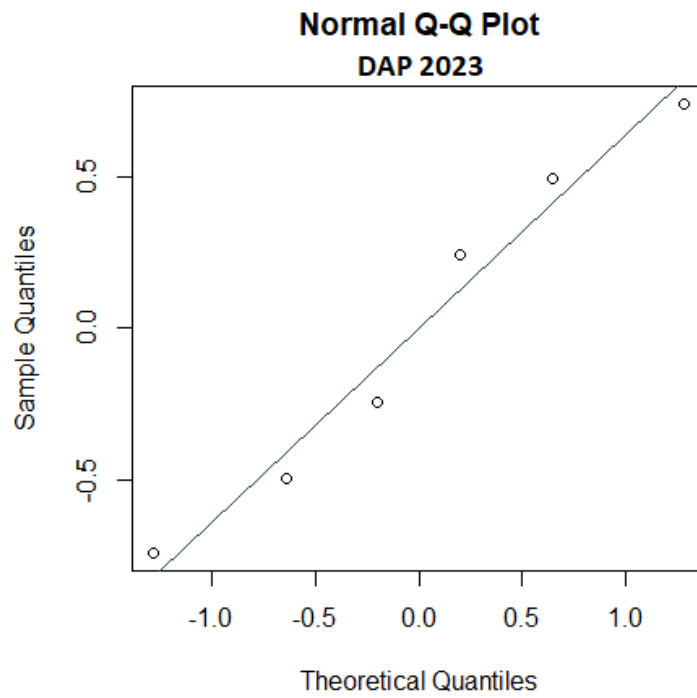


Fig. 20. Gráficos *QQ*-plot para diámetro a la altura del pecho a los 2,5 años

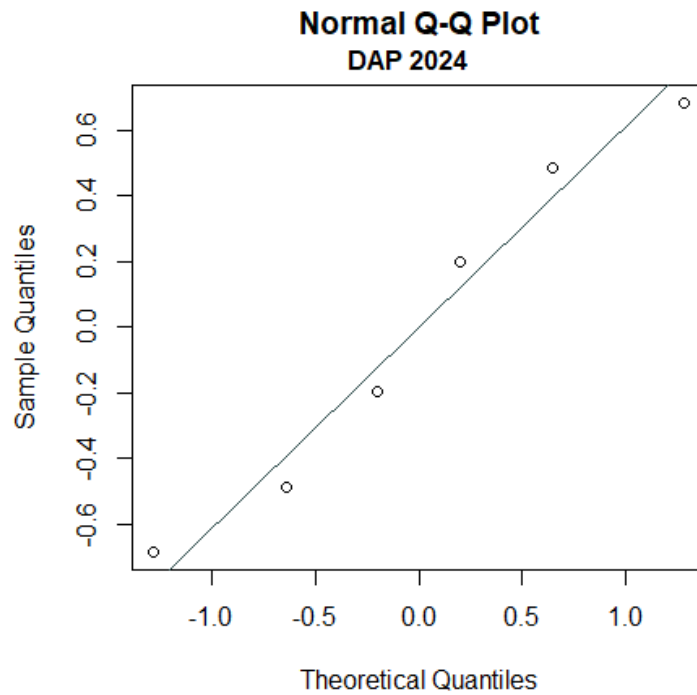


Fig. 21. Gráficos *QQ*-plot para diámetro a la altura del pecho a los 3,6 años

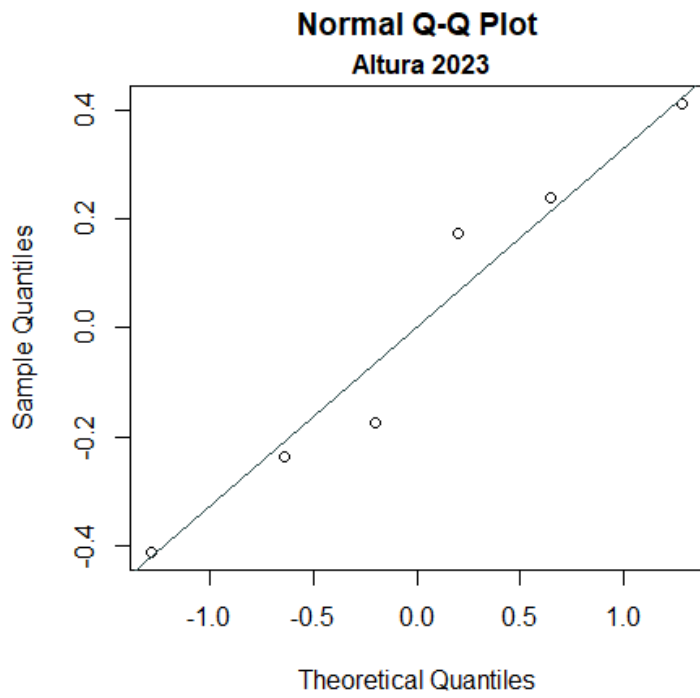


Fig. 22. Gráficos *QQ*-plot para altura total a los 2,5 años

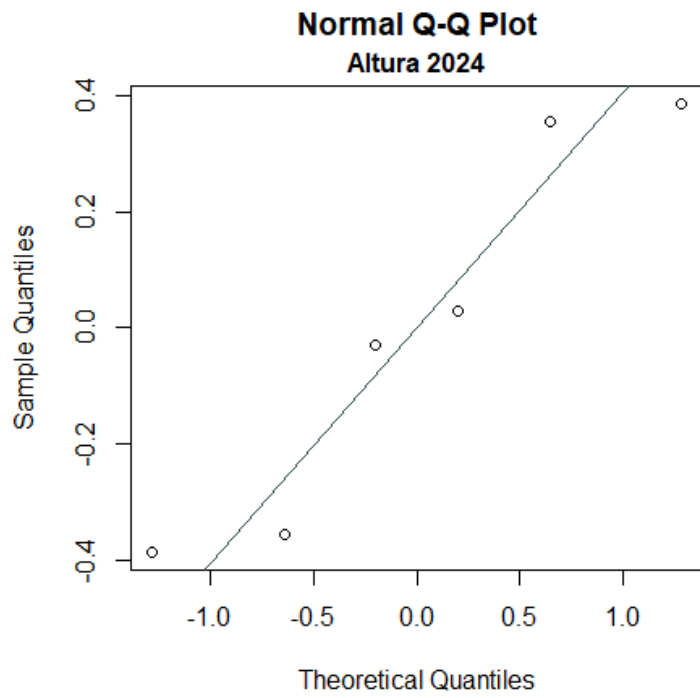


Fig. 23. Gráficos *QQ*-plot para altura total a los 3,6 años

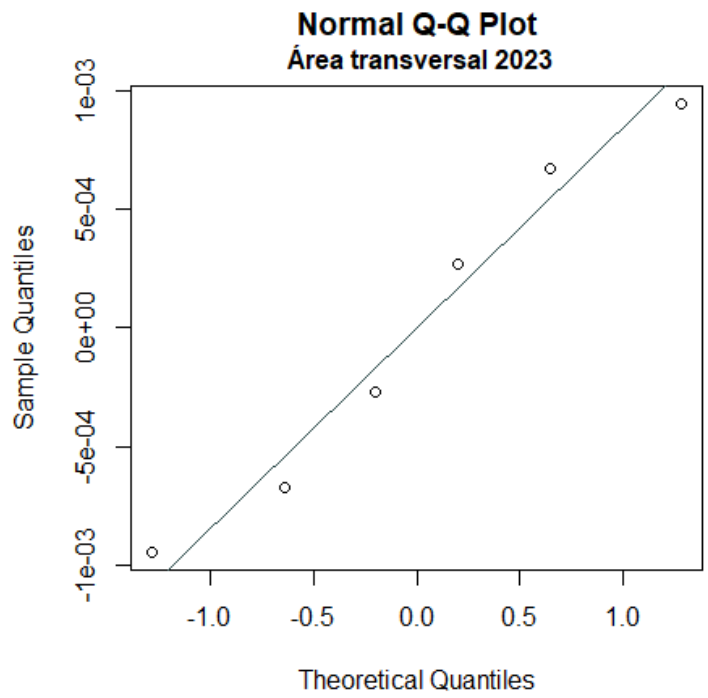


Fig. 24. Gráficos *QQ*-plot para área transversal a los 2,5 años

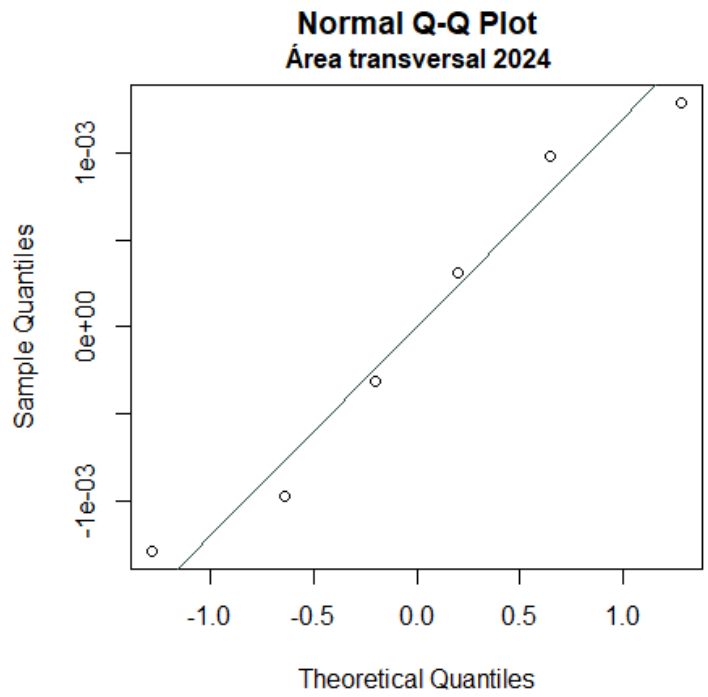


Fig. 25. Gráficos *QQ*-plot para área transversal a los 3,6 años

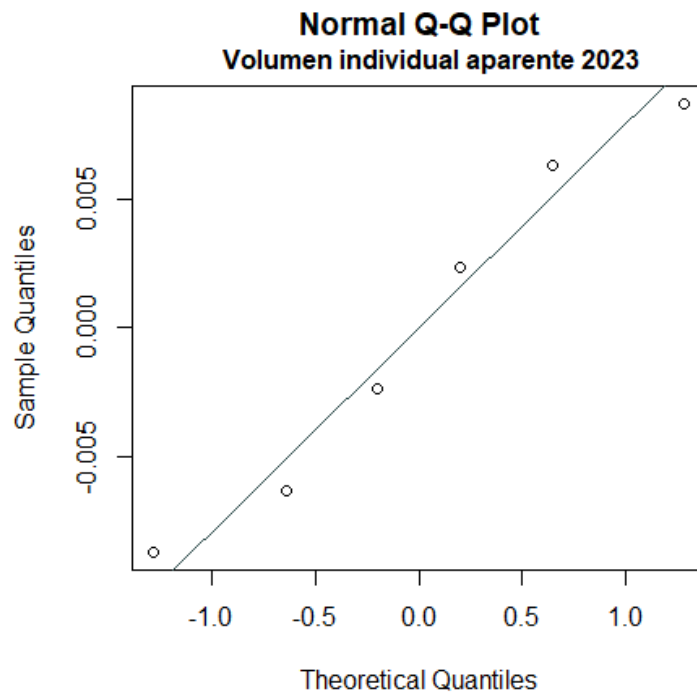


Fig. 26. Gráficos *QQ*-plot para volumen individual aparente a los 2,5 años

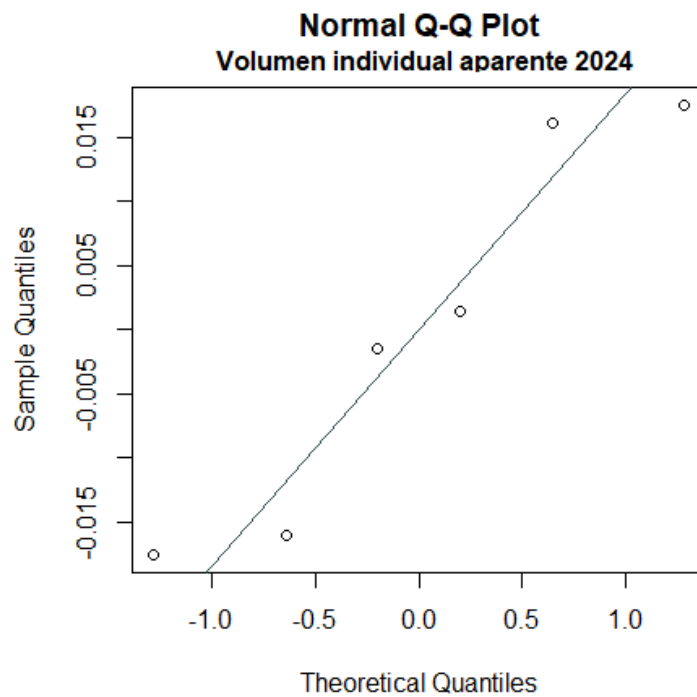


Fig. 27. Gráficos *QQ*-plot para volumen individual aparente a los 3,6 años

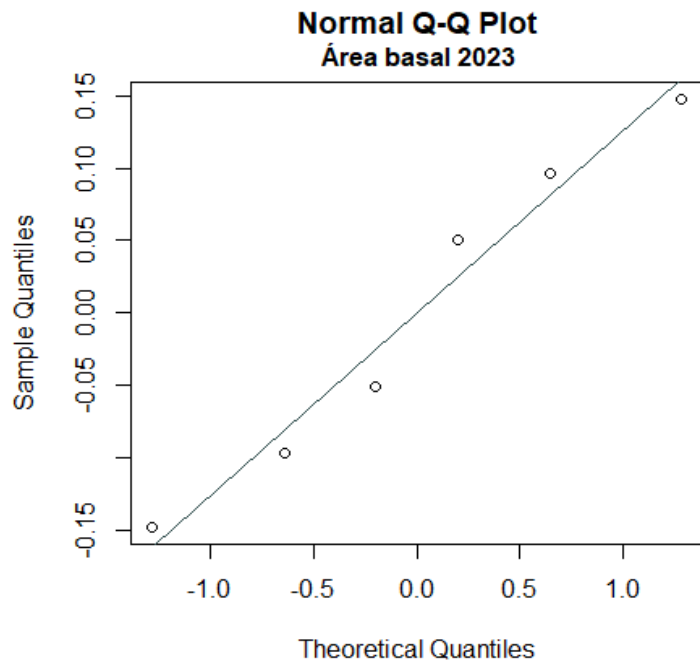


Fig. 28. Gráficos QQ-plot para área basal a los 2,5 años

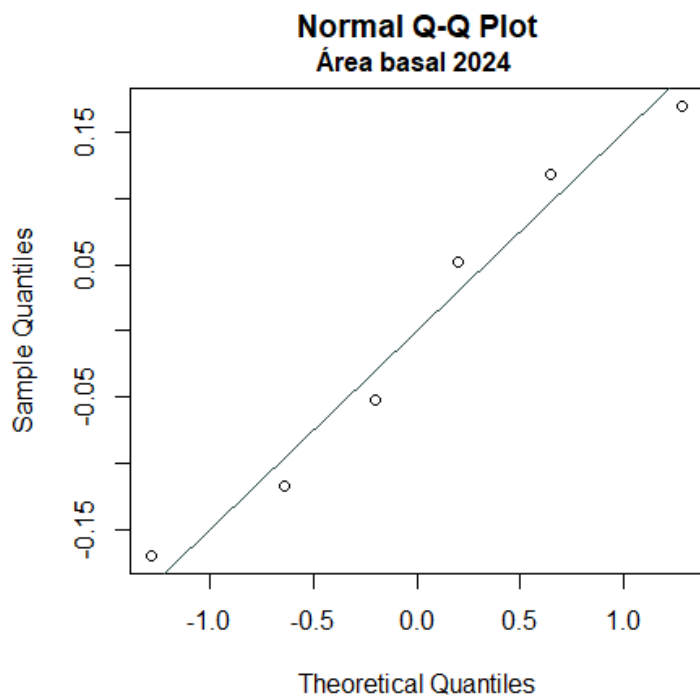


Fig. 29. Gráficos QQ-plot para área basal a los 3,6 años

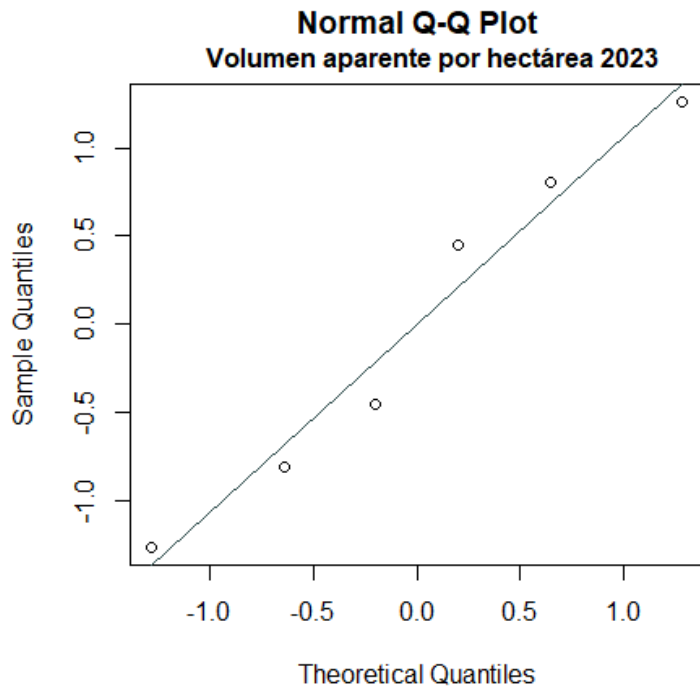


Fig. 30. Gráficos *QQ*-plot para volumen aparente por hectárea a los 2,5 años

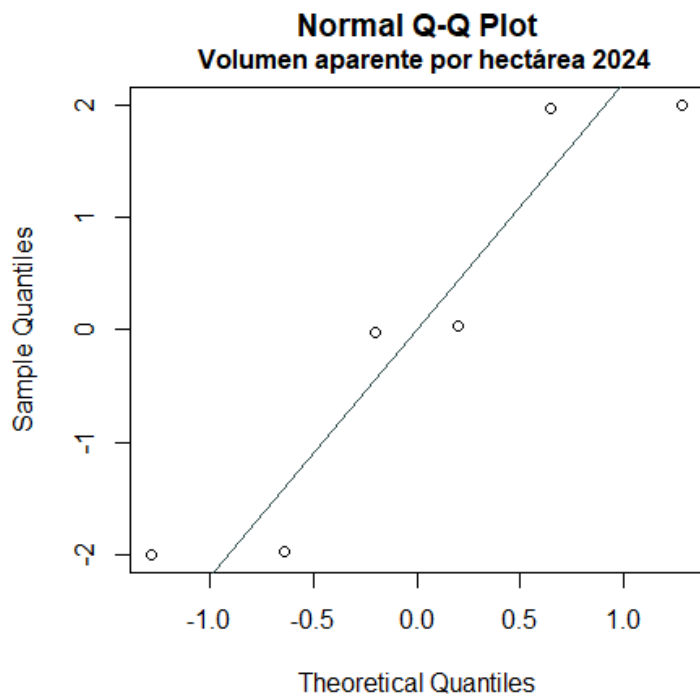


Fig. 31. Gráficos *QQ*-plot para volumen aparente por hectárea a los 3,6 años