UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA DE LA PLANTACIÓN DE *EUCALYPTUS GRANDIS* W. HILL EX MAIDEN SOBRE VARIABLES DENDROMÉTRICAS, DASOMÉTRICAS Y MICROCLIMÁTICAS EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

por

Catherine Daiana MOREIRA NUÑEZ

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
"Creative Commons **Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Mag.) Valentina Benítez

Director/a:

Ing. Agr. (Mag.) Paulina Siri

Codirector/a:

Zoot. (Dr.) Jean Kássio Fedrgio

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Valentina Benítez

Ing. Agr. (Mag.) Hernán Bueno

Ing. Agr. (Dra.) Ludmila Profumo

Fecha: 20 de octubre de 2026

Estudiante:

Catherine Daiana Moreira Nuñez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa de este recorrido.

A mi pareja, por su acompañamiento, paciencia y apoyo durante todo este proceso.

A mis tutores, Valentina Benítez, Paulina Siri y Jean Fedrigo, por su apoyo técnico, orientación y dedicación durante la realización de este trabajo.

A Carlos González, Pablo Posada, Gastón Pintos y Nicolás Llanos, por su ayuda durante el trabajo de campo y por compartir información que fue fundamental para el desarrollo de esta tesis.

A toda mi familia y amigos, por estar presentes, brindarme su apoyo y compartir conmigo esta etapa tan importante. En especial, a mis tíos Claudia y Marcos y a mi prima Ana.

A todos, muchas gracias por haber sido parte de esta etapa tan importante.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN *3*

AGRADECIMIENTOS *4*

RESUMEN *8*

ABSTRACT *9*

1 INTRODUCCIÓN *10*

1.1 Objetivos **11**
1.1.1 Objetivo general 11
1.1.2 Objetivos específicos 11

1.2 Hipótesis **11**

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA *12*

2.1 Definición de Sistemas silvopastoriles y situación en Uruguay **12**

2.2 Componente arbóreo **13**
2.2.1 Generalidades del género Eucalyptus 13
2.2.2 Características de *Eucalyptus grandis* 13
2.2.3 Manejo silvícola 14

2.3 Microclima en sistemas silvopastoriles **16**
2.3.1 Radiación 16
2.3.2 Temperatura del aire y suelo 17
2.3.3 Humedad del aire y del suelo 17
2.3.4 Viento 18

3 MATERIALES Y MÉTODOS *19*

3.1 Descripción de sitio de estudio **19**

3.2 Descripción del diseño experimental **21**

3.3 Datos de inventario **22**

3.4 Evaluación del microclima **25**

3.5 Análisis estadístico **25**
3.5.1 Variables dendrométricas de fuste y copa 25
3.5.2 Variables microclimáticas 26

4 RESULTADOS *28*

4.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes **28**
4.1.1 Diámetro a la altura de pecho 28
4.1.2 Altura total 29
4.1.3 Área transversal y basal 31
4.1.4 Volumen aparente 32
4.1.5 Parámetros dendrométricos de copa 32

4.2 Condiciones microclimáticas **34**
4.2.1 Temperatura del aire 34
4.2.2 Humedad relativa del aire 35

5 DISCUSIÓN *39*

5.1 Componente arbóreo **39**
5.1.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes 39
5.1.2 Variables de copa 41

5.2 Microclima 41

6 CONCLUSIONES 44

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

8 ANEXOS 50

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Características de los tratamientos evaluados 22
Tabla 2 Ecuaciones utilizadas para el cálculo de las variables dendrométricas y de copa 24
Tabla 3 ANOVA y medias estimadas para DAP..... 29
Tabla 4 ANOVA y medias estimadas para altura total..... 31
Tabla 5 Medias ajustadas y significancia estadística para g y AB 32
Tabla 6 Medias ajustadas y significancia estadística para v y V..... 32
Tabla 7 ANOVA para la HR media diaria por estación y período..... 37
Tabla 8 Medias ajustadas de HR (%) para invierno día 38
Tabla 9 Contrastes ortogonales para la HR (%) durante invierno- día..... 38

Figura 1 Características morfológicas vegetativas y reproductivas de E. grandis 14
Figura 2 Ubicación del sitio de estudio..... 19
Figura 3 Diagrama climático de Walter-Lieth de la estación meteorológica Melo, Cerro Largo, Uruguay (1991–2020)..... 20
Figura 4 Grupos CONEAT del área de estudio..... 21
Figura 5 Distribución espacial de los bloques experimentales (B1- amarillo, B2 - verde y B3 - violeta)..... 22
Figura 6 Variables dendrométricas y de copa utilizadas en el estudio..... 24
Figura 7 Distribución de frecuencias absolutas de DAP para los tratamientos 2F y 4F en 2023, 2024 y 2025 28
Figura 8 Distribución de frecuencias absolutas de altura para los tratamientos 2F y 4F en 2023, 2024 y 2025 30
Figura 9 Medias ajustadas e intervalos de confianza para diámetro y largo de copa.... 33
Figura 10 Medias ajustadas e intervalos de confianza para porcentaje, área y volumen de copa..... 34
Figura 11 Temperatura media diaria (°C) según tratamiento, estación del año y período del día 35
Figura 12 Humedad relativa media diaria (%) según tratamiento, estación del año y período del día 36

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) integran árboles, pasturas y ganado en una misma unidad productiva. En ellos, la densidad y el arreglo espacial del componente arbóreo condicionan el crecimiento de los árboles y la estructura del dosel, que a su vez puede modificar el microclima a nivel de la pastura. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos arreglos de plantación de *Eucalyptus grandis* sobre variables dendrométricas y dasométricas del fuste y de la copa, y sobre la temperatura y la humedad relativa del aire. El estudio se realizó en la plataforma experimental "Mi Capricho" (32°11′04″ S, 54°13′51″ O; Cerro Largo, Uruguay), en una plantación de origen seminal establecida en 2020 sobre campo natural. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con tres bloques y tres tratamientos: filas dobles (2F; 160 árboles ha^{-1}), filas cuádruples (4F; 229 árboles ha^{-1}), ambos con un espaciamiento de 5 × 5 m y callejones de 20 m, y un control sin árboles. El diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total se midieron por censo a los 2,5, 3,6 y 5 años y las variables de copa, a los 5 años. La temperatura y la humedad relativa del aire se registraron cada hora durante un año en el callejón y la entrefila de 2F y 4F y en el control. Las variables del componente arbóreo se analizaron con modelos lineales según el diseño experimental y las microclimáticas, con modelos lineales mixtos para cada estación y período del día, con el bloque y el día como efectos aleatorios. El DAP y la altura no difirieron entre arreglos en ninguna de las edades evaluadas y su evolución con la edad fue similar; tampoco difirieron las variables de copa. En cambio, a los 5 años, 4F presentó un 57 % más de área basal (7,3 frente a 4,7 $m^2\ ha^{-1}$) y un 63 % más de volumen aparente por hectárea (103,9 frente a 63,6 $m^3\ ha^{-1}$), atribuibles principalmente a su mayor densidad. La temperatura media del aire no difirió entre tratamientos y la humedad relativa sólo difirió durante el día en invierno, cuando fue levemente mayor en 4F que en 2F; en ningún caso los sistemas con árboles difirieron del campo abierto. A esta edad, el aumento de la densidad dentro del rango evaluado incrementó la productividad del rodal sin reducir el crecimiento individual de los árboles ni modificar el microclima medio de la pastura.

Palabras clave: arreglo espacial, densidad de plantación, área basal, microclima, humedad relativa

ABSTRACT

Silvopastoral systems (SPS) integrate trees, pastures and livestock within the same production unit. In these systems, the density and spatial arrangement of the tree component condition tree growth and canopy structure, which in turn may modify the microclimate at pasture level. The objective of this study was to evaluate the effect of two planting arrangements of *Eucalyptus grandis* on dendrometric and dasometric variables of the stem and crown, and on-air temperature and relative humidity. The study was conducted at the "Mi Capricho" experimental platform (32°11′04″ S, 54°13′51″ W; Cerro Largo, Uruguay), in a seed-origin plantation established in 2020 on native grassland. A randomized complete block design was used, with three blocks and three treatments: double rows (2F; 160 trees ha^{-1}), quadruple rows (4F; 229 trees ha^{-1}), both with 5 × 5 m spacing and 20 m alleys, and a treeless control. Diameter at breast height (DBH) and total height were measured by census at 2.5, 3.6 and 5 years of age, and crown variables at 5 years. Air temperature and relative humidity were recorded hourly for one year in the alley and between tree rows in 2F and 4F, and in the control. Tree variables were analyzed with linear models according to the experimental design, and microclimatic variables with linear mixed models for each season and period of the day, with block and day as random effects. DBH and height did not differ between arrangements at any age, and their development over time was similar; crown variables did not differ either. In contrast, at 5 years, 4F had 57% more basal area (7.3 vs. 4.7 m^2 ha^{-1}) and 63% more apparent volume per hectare (103.9 vs. 63.6 m^3 ha^{-1}), mainly due to its higher density. Mean air temperature did not differ between treatments, and relative humidity differed only during winter daytime, when it was slightly higher in 4F than in 2F; in no case did the systems with trees differ from the open field. At this age, increasing tree density within the evaluated range increased stand productivity without reducing individual tree growth or modifying the mean microclimate at pasture level.

Keywords: spatial arrangement, planting density, basal area, microclimate, relative humidity

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sector forestal uruguayo ha experimentado un notable desarrollo, tanto a nivel de cultivo como industrial. Durante la década de 1990 se implementó la segunda Ley Forestal (N° 15.939), la cual impulsó significativamente la expansión de las plantaciones de *Eucalyptus* y promovió el crecimiento y la radicación de la industria vinculada a la madera como principal materia prima (Boscana & Boragno, 2018).

En la actualidad, el sector forestal se posiciona como uno de los principales rubros exportadores del país. La implementación de políticas de Estado y de diversos incentivos económicos han impulsado, a lo largo de los años, un notable incremento de las inversiones tanto nacionales como extranjeras (Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social [CERES], 2023).

Según Miguel (2020), la ganadería es una actividad tradicional en Uruguay, presente en todo el territorio nacional bajo diversas modalidades productivas. A partir de la expansión del sector forestal, la forestación ha ocupado una superficie creciente del espacio rural uruguayo. Sin embargo, pese a constituir dos pilares de la producción nacional, ambas actividades aún no han logrado una integración efectiva. El autor señala que uno de los principales factores que limitan esa integración es la escasa disponibilidad de información técnica y económica dirigida a los productores.

A partir de la década de los años 40 del siglo pasado se destacó la importancia de establecer cortinas rompeviento, así como bosques de sombra y protección (Rubbo, 1940, como se cita en Pastorini & Acosta, 2011). Posteriormente, el primer registro de un sistema integrado con el objetivo de diversificar ingresos data del año 1960 (Viñoles et al., 2017). A partir de estas experiencias iniciales surgieron los sistemas silvopastoriles (SSP), entendidos como la interrelación entre el árboles, pasturas y animales, con el propósito de obtener de un mismo sistema productos primarios agroforestales como madera y pecuarios como carne, lana y en algunos casos leche (Sancho et al., 2021).

Según Sancho et al. (2021), la decisión de mayor relevancia al diseñar un SSP es la definición de su objetivo productivo, ya que este determinará la elección de las especies arbóreas, su densidad y el arreglo espacial de la plantación. Estos factores inciden directamente en las condiciones microclimáticas bajo las copas de los árboles, influyendo en aspectos como la radiación solar disponible para la pastura, la humedad del aire y del suelo, la temperatura y la velocidad del viento. La acción protectora de los árboles permite atenuar el impacto del frío sobre los animales durante el invierno y del calor estival, disminuir la pérdida de humedad del suelo durante el verano, favoreciendo así el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de forraje y, en consecuencia, la productividad animal.

El presente trabajo final de grado se propone analizar cómo la densidad y el arreglo de los árboles en una plantación de *Eucalyptus grandis* modifican las variables dendrométricas, dasométricas y microclimáticas, en particular la temperatura y la humedad relativa del aire en el sotobosque en sistemas silvopastoriles (SSP).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la estructura de la plantación sobre variables dendrométricas y dasométricas (fuste y copa) y variables microclimaticas en una plantación silvopastoril de *Eucalyptus grandis*.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Comparar el efecto de diferentes densidades arbóreas sobre variables dasométricas y dendrométricas de copa y fuste, en un SSP.
2. Evaluar el efecto año sobre variables dasométricas y dendrométricas de fuste en un SSP.
3. Evaluar el efecto de diferentes densidades arbóreas en variables microclimáticas en callejón, entrefila y campo abierto, en un SSP.

1.2 Hipótesis

A medida que aumenta la densidad arbórea se incrementa la competencia entre individuos derivando en árboles con menores diámetros y menor desarrollo de la copa. A su vez, esta mayor competencia genera individuos de mayor altura.

La densidad y el arreglo de los árboles modifican las condiciones microclimáticas de los sistemas silvopastoriles. Se espera que, a mayor densidad arbórea, la temperatura media del aire sea menor y la humedad relativa sea mayor en comparación con el campo abierto.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definición de Sistemas silvopastoriles y situación en Uruguay

Los SSP presentan definiciones distintas según los diversos autores y organismos nacionales e internacionales. Sin embargo, existe consenso en que estos sistemas implican la combinación de especies leñosas (árboles o arbustos) con especies herbáceas y animales dentro de una misma unidad productiva (Sancho et al., 2021). En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) los define como la combinación natural o asociación deliberada de uno o varios componentes leñosos, arbustivos y/o arbóreos, dentro de pasturas de gramíneas o leguminosas herbáceas, nativas o cultivadas y su utilización con rumiantes y herbívoros (FAO, como se cita en Sancho et al., 2021). En Uruguay, estos sistemas se caracterizan por la integración planificada de largo plazo de árboles, ganado y pasturas, interactuando de manera armónica con el fin de maximizar la producción de forma sostenible. Estos sistemas se destacan como plantaciones forestales no convencionales diseñadas con densidades iniciales bajas, disposición en múltiples filas y presencia de callejones que facilitan la producción combinada (Sancho et al., 2021).

Con el objetivo de promover el desarrollo sostenible de los SPP en campo natural, la resolución N°1.613/025 establece una serie de criterios técnicos para su implementación. Entre ellos, se dispone que las plantaciones mantengan densidades comprendidas entre 40 y 300 árboles por hectárea, con callejones de al menos 18 m de ancho y un máximo de tres hileras contiguas. Asimismo, se establecen distancias mínimas de plantación de 3 m entre árboles y 4 m entre filas, además de la realización de podas y raleos que permitan alcanzar una densidad máxima de 200 árboles por hectárea al turno final. La normativa también determina que la superficie ocupada por el componente forestal no podrá superar el 50% del área de pastoreo, procurando así preservar la producción forrajera como actividad principal del sistema y garantizar la sostenibilidad de la producción integrada (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], 2025).

De acuerdo con la consultoría realizada por Sancho et al. (2021), hasta esa fecha se identificaron 39 establecimientos que desarrollan SSP, abarcando una superficie efectiva aproximada de 6.350 hectáreas. La superficie relevada se distribuye principalmente en la región sureste del país (79 %), seguida por la región centro-sur (15 %) y el norte (6 %). En los SSP relevados a nivel nacional la especie predominante es *Eucalyptus globulus* Labill (56%), lo cual se relaciona con la concentración de estos sistemas en la región sureste. Le sigue *Eucalyptus smithii* R.T. Baker (15%), especie que ha cobrado relevancia en los últimos años como alternativa a la anterior debido a factores sanitarios, de comercialización y de promoción en este tipo de sistemas. En tercer lugar, se encuentra *Eucalyptus grandis* (10%) (Sancho et al., 2021).

En cuanto al diseño espacial, la mayoría de los sistemas silvopastoriles del país presentan arreglos de doble o triple fila, con callejones de 6 a 8 metros de ancho y densidades superiores a 900 árboles por hectárea (Sancho et al., 2021).

La implementación de los SSP planificados, orientados a favorecer la sinergia entre sus componentes, continúa siendo limitada en Uruguay. Esto ocurre incluso con el impulso brindado por el programa Ganadero del MGAP, que ha ofrecido exoneraciones impositivas y líneas de crédito preferenciales (Tamosiunas, 2015). La integración de la forestación en predios ganaderos no está suficientemente difundida por limitantes de

diversa índole. Entre las principales se destacan las culturales, asociadas a una baja valoración de los servicios ecosistémicos que ofrecen estos sistemas y a la percepción de que la forestación a gran escala compite con la ganadería por el uso del suelo (Pastorini & Acosta, 2011).

En este contexto, resulta pertinente analizar el componente arbóreo de los SSP, dado su papel central en la estructura y funcionamiento de esos sistemas. Entre las especies forestales utilizadas en Uruguay para la integración con la ganadería, las pertenecientes al género *Eucalyptus* han adquirido especial relevancia debido a su amplia adaptación, rápido crecimiento y elevado potencial productivo.

2.2 Componente arbóreo

2.2.1 Generalidades del género Eucalyptus

El género *Eucalyptus* comprende aproximadamente 950 especies pertenecientes a la familia Myrtaceae, subfamilia Leptospermoideae, siendo la mayoría nativas y endémicas de Australia (Barros Asenjo, 2012). Las especies presentan una distribución edafoclimática característica, determinada por la interacción entre las condiciones del suelo y el clima. Esta relación influye directamente en su capacidad de adaptación a ambientes distintos de su zona de origen, lo cual depende del grado de sensibilidad que manifiestan frente a las características del sitio forestal (Brussa, 1994).

2.2.2 Características de *Eucalyptus grandis*

Eucalyptus grandis es una especie originaria de Australia, localizada en el este del continente australiano, norte de Nueva Gales del Sur y sur de Queensland. Su presencia se concentra en una franja de aproximadamente 100 km de ancho, con mayor frecuencia por debajo de los 350 m.s.n.m, aunque en regiones más tropicales pueden encontrarse hasta los 900 m.s.n.m. (*Grandis*, 1994).

En Uruguay, *E. grandis* constituye una de las principales especies utilizadas en las plantaciones forestales comerciales. Según la Dirección General Forestal (2021), ocupa una superficie aproximada de 250.964 ha y presenta una mayor representación en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Cerro Largo y Rivera, aunque también se encuentra distribuida en otros departamentos del país. Se trata de una de las especies más empleadas en las forestaciones comerciales debido a su buena conformación, su rápida tasa de crecimiento y su alto rendimiento productivo (Brussa, 1994).

2.2.2.1 Descripción botánica

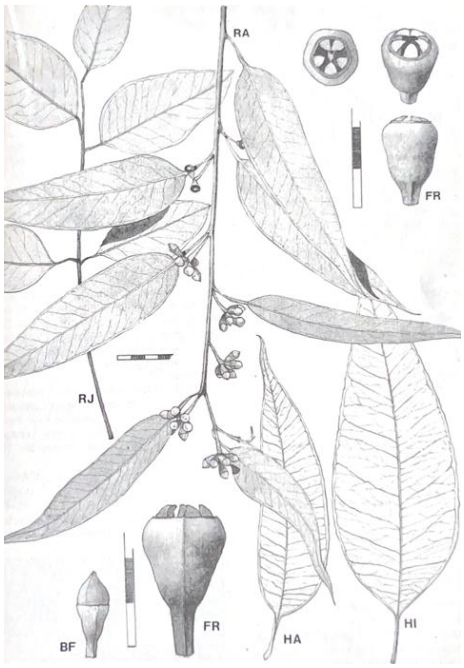
Esta especie presenta características distintivas que la identifican como árbol de gran porte, con tronco recto, alcanzando generalmente de 45 a 55 m de altura y de 1,2 a 2 m de diámetro a la altura del pecho (DAP) (Boland et al., 2006). Presenta corteza caduca en largas fajas, con ritidoma de color gris verdoso a blanquecino y una porción basal persistente y escamosa de 1 a 3 m de altura (Brussa, 1994).

Las primeras hojas son opuestas y ovales; posteriormente, las hojas juveniles presentan filotaxia alterna, son pecioladas, con ápice agudo acuminado y base redondeada, discoloras, con el haz verde oscuro. Las hojas intermedias también son alternas y pecioladas, de forma oval-lanceoladas, con ápice agudo, base cuneada y nervaduras secundarias transversales, siendo marcadamente discoloras (Brussa, 1994).

Las flores se agrupan en inflorescencias simples axilares, sobre pedúnculos aplanados, pedicelos ausentes o de hasta 0,3 cm de largo y angulares, con los ángulos continuando como costillas a lo largo del hipantio (Boland et al., 2006). Los botones florales son ovoides o globosos, generalmente glaucos y presentan un opérculo cónico o rostrado, menor que el hipantio (Brussa, 1994). Los frutos son piriformes, con una contracción en el orificio y en parte de la zona central, pedicelos cortos y un disco plano - incluso poco visible. Presentan 4 a 6 valvas levemente excertas y curvas, cuyos ápices permanecen convergentes incluso en la madurez (Brussa, 1994).

Figura 1

Características morfológicas vegetativas y reproductivas de E. grandis



Nota. Tomado de Brussa (1994).

La madera de *E. grandis* presenta duramen rosado, moderadamente duro y durable, con una densidad seca al aire que varía de 545 a 955 kg/m^3. Estas características, sumadas a su utilización en construcción en general, carpintería, fabricación de madera contrachapada y paneles, así como en la construcción naval y pisos, hacen que la producción de madera de calidad constituya un aspecto relevante en el manejo de la especie (Boland et al., 2006). En este sentido, dadas las particularidades de la especie y su destino productivo, resulta esencial implementar prácticas de manejo como la poda y el raleo, que permiten regular el crecimiento de los árboles y contribuyen a mejorar la calidad y características de la madera obtenida.

2.2.3 Manejo silvícola

En los SSP, las prácticas silvícolas cumplen un papel fundamental en la regulación de la estructura del componente arbóreo y en las interacciones entre árboles, pasturas y animales. Entre las principales herramientas de manejo se destacan la poda y el raleo, las cuales permiten modificar la densidad y arquitectura del dosel, influyendo sobre la disponibilidad de luz que alcanzan la pastura y, en consecuencia, sobre las condiciones microclimáticas del sistema (Sotomayor Garretón & Teuber Winkler, 2011).

2.2.3.1 Poda

Cuando se habla de poda en una especie que, de manera natural desarrolla un tronco recto y vertical, como en *E. grandis*, el término hace referencia específicamente a la remoción de ramas tanto vivas como muertas, mediante su corte al ras del fuste. Esta práctica se diferencia de la poda de formación aplicada en otras especies latifoliadas, cuyo propósito es obtener individuos con fustes rectos y de longitudes adecuadas (Gómez Pivel, 1995).

Según Gómez Pivel (1995), si bien la poda puede tener diversos objetivos, su finalidad principal es aumentar la proporción de madera libre de nudos en las trozas de mayor valor comercial, especialmente en aquellos árboles destinados a aserrío o laminado. La presencia de nudos constituye una característica indeseable en la madera con este destino, ya que genera dificultades tanto en su procesamiento como en su uso final. A modo de ejemplo, la madera con nudos presenta mayor propensión al colapso durante el secado, reduce la eficacia del proceso de impregnación, posee menor resistencia mecánica y resulta menos atractiva estéticamente. Por lo tanto, la realización de podas adecuadas es indispensable para obtener madera de calidad superior, capaz de competir en los mercados externos de productos aserrados y/o debobinados.

En la producción de madera de calidad se procura que el cilindro con defectos tenga el menor volumen posible y que su diámetro se mantenga constante a lo largo del fuste, desde la base hasta la altura de poda planificada. Una consideración importante para controlar el tamaño del cilindro nudoso es la época del año en la que se realiza la poda. Lo más conveniente es efectuarla durante los períodos de crecimiento más activo, es decir, en otoño y primavera, ya que esto favorece una rápida cicatrización y reduce el tiempo de exposición al ataque de hongos e insectos. Por el contrario, se debe evitar el invierno debido a la alta susceptibilidad del *Eucalyptus grandis* a las bajas temperaturas (Pelufo Laxalde & Vázquez Albertini, 2007). Además de contribuir a la producción de madera de calidad, la poda adquiere especial relevancia en los SSP, ya que contribuyen a incrementar la radiación que llega a la pastura, favoreciendo el desarrollo del componente herbáceo y mejorando las condiciones para la producción forrajera (Nicodemo et al., 2016).

2.2.3.2 Raleo

Uno de los principales objetivos de esta práctica silvicultural es poder producir madera con altos niveles de crecimiento individual y de calidad acorde con los requerimientos de la industria. El raleo es una técnica silvícola para producir madera aserrada de calidad, donde se realizan cortes parciales en las masas forestales inmaduras (Lima, 2005). Con esta técnica se reduce el número de árboles por hectárea, aumentando así el volumen de madera de los árboles remanentes ya que el crecimiento se concentra en un menor número de individuos, obteniendo mayores diámetros al final de la rotación (Lima, 2005). Según el destino de los productos obtenidos, los raleos pueden clasificarse en precomerciales o a desecho, cuando se realizan en etapas tempranas del desarrollo del rodal, y en comerciales, cuando se ejecutan en fases más avanzadas del ciclo, permitiendo la obtención de madera con valor económico (Walstad & Kuch, como se cita en Espinosa Bancalari & Muñoz Sáez, 2005).

Espinosa Bancalari y Muñoz Sáez (2005) distinguen cinco tipos de raleo en función de los árboles seleccionados para su extracción:

- raleo por lo bajo, que elimina principalmente individuos de copas inferiores,

- raleo por lo alto, que remueve mayoritariamente árboles codominantes y, en algunos casos, dominantes de mala forma,
- raleo de dominantes, que suprime árboles dominantes para favorecer el crecimiento de los codominantes e intermedios,
- raleo sistemático, que no considera las características individuales de los árboles, eliminando ejemplares de todas las clases diamétricas y
- raleo libre, que combina los criterios de los tipos anteriores, sin otorgar prioridad a ninguno en particular.

En los SSP, el raleo constituye una herramienta de manejo que, además de regular la competencia entre árboles, permite incrementar la radiación disponible en el interior del sistema. De esta forma, contribuye a generar condiciones más favorables para el crecimiento de las pasturas y el equilibrio entre los componentes forestal y ganadero (Nicodemo et al., 2016).

2.3 Microclima en sistemas silvopastoriles

Barnes et al. (1998, como se cita en Promis et al., 2010, p.129) definen el microclima como "el conjunto de condiciones climáticas propias de un punto geográfico o área reducida, que representan una modificación local del clima general de la región debido a la influencia de distintos factores ecológicos". En este sentido, diversos estudios han demostrado que los sistemas silvopastoriles generan modificaciones en el microclima y en sus diferentes componentes, como la temperatura del aire y del suelo, la humedad relativa y la radiación fotosintéticamente activa (Fedrigo et al., 2018; Munka, 2017). Estas alteraciones pueden tener efectos tanto positivos como negativos: por un lado, contribuyen a atenuar los extremos térmicos del aire y del suelo; por otro, reducen la cantidad de radiación disponible para el estrato herbáceo. En conjunto, estas condiciones pueden influir de manera favorable o desfavorable sobre el crecimiento forrajero en este tipo de sistemas (Fedrigo et al., 2018; Feldhake & Belesky, 2009).

2.3.1 Radiación

La intercepción de la radiación solar por parte de los árboles genera condiciones de mayor confort térmico para los animales, pero al mismo tiempo puede comprometer la actividad fotosintética de las plantas forrajeras. La radiación solar de mayor calidad, constituida por longitudes de onda de alta efectividad fotosintética (fracciones rojo y azul), es absorbida en mayor proporción por el componente arbóreo, mientras que al estrato herbáceo llegan espectros luminosos de menor calidad (Feldhake & Belesky, 2009).

En este contexto, la disponibilidad de luz en el sotobosque depende tanto de las prácticas silvícolas aplicadas como de la arquitectura de copa y de las características de crecimiento propias de la especie arbórea seleccionada (Sotomayor Garretón & Teuber Winkler, 2011).

Las plantas que crecen en condiciones de sombra reciben una mayor proporción de luz con menor relación rojo/rojo lejano, lo que desencadena varios procesos metabólicos vinculados a la adaptación de la planta a la calidad de luz disponible (Fedrigo et al., 2018).

2.3.2 Temperatura del aire y suelo

La temperatura del aire refleja el grado de calentamiento o enfriamiento del aire que resulta del intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie terrestre. Su variación está condicionada por factores como la altura de dosel, la densidad arbórea, la orientación y las condiciones climáticas predominantes, que modulan la disponibilidad de radiación y el flujo energético (Sotomayor Garretón et al., 2009).

En los sistemas silvopastoriles la temperatura del aire y del suelo constituye una de las variables microclimáticas más influenciadas por la presencia del componente arbóreo, según Munka (2017), estos sistemas generan modificaciones significativas en los extremos térmicos, atenuando las variaciones diarias y estacionales.

La cobertura arbórea actúa como un regulador térmico, contribuyendo a temperaturas más cálidas durante el invierno (con menor probabilidad de heladas) y más frescas durante el verano (Fedrigo et al., 2018). Cuanto más denso sea el dosel, mayor influencia tendrá sobre los cambios de temperatura del aire (Munka, 2017). En este sentido, *La integración de forestaciones* (2016) señala que la amplitud térmica disminuye proporcionalmente al incremento en la densidad arbórea.

La temperatura del suelo, entendida como el calor almacenado es sus horizontes, también se ve modulada por el dosel. Su valor medio varía en función del espaciamiento, la densidad y la altura de los árboles. Bahamonde et al. (2009) reportan reducciones de hasta 3,8°C en verano en sistemas con árboles de entre 6 y 8 m de altura y de 2,1°C en rodales con alturas inferiores a 6 m.

2.3.3 Humedad del aire y del suelo

Munka (2017) señala que los sitios sin cobertura arbórea presentan un microclima menos húmedo en comparación con las áreas ubicadas bajo el dosel forestal. En términos generales, la humedad relativa del aire suele ser mayor en las áreas con cobertura arbórea, aunque la magnitud del cambio depende de la altura del estrato arbóreo, Bahamonde et al. (2009) reportan incrementos aproximados de 3 % en rodales de hasta 6 m y de 20% en rodales de 6-8 m.

El aumento de la humedad relativa bajo cubiertas forestales se asocia a temperaturas máximas más bajas, menor renovación de aire, baja turbulencia y una mayor resistencia aerodinámica a la disipación del vapor de agua. Durante el día, el perfil vertical de la humedad normalmente disminuye con la altura, presentando una leve inflexión (aumento) en la zona de mayor proporción de hojas en la copa, donde se constata una mayor absorción y transpiración. Durante la noche, las zonas superficiales próximas al suelo registran los mayores valores de humedad (Munka, 2017).

Siempre que el suelo no esté completamente saturado, se ha comprobado que el componente arbóreo y herbáceo van a competir por la humedad disponible en el suelo. Sin embargo, en situaciones de sequía extrema, la presencia del componente arbóreo puede favorecer el desarrollo del forraje de la pastura, ya que reduce la evapotranspiración del cultivo al disminuir la temperatura y la velocidad del viento (Peri et al., 2016).

En el caso de las cortinas cortavientos, Sotomayor Garretón et al. (2009) describen incrementos de 2 a 4% en la humedad relativa respecto a áreas de campo abierto. Este efecto depende en gran medida de la densidad de la cortina. Una mayor humedad relativa implica una reducción de la evapotranspiración y, en consecuencia, un menor consumo

hídrico de las plantas, lo que se traduce en una mayor eficiencia productiva en comparación con sistemas sin protección.

2.3.4 Viento

Munka (2017) menciona que la presencia de árboles modifica la magnitud del viento y la circulación del aire bajo el dosel. El principal efecto que sufre el viento al encontrarse con árboles es la reducción de la velocidad. Dicho efecto en conjunto con la sombra que generan las superficies forestadas, se lo considera como un servicio animal (abrigo y sombra) provocando que los animales se encuentren en condiciones de confort en situaciones adversas, tanto por frío o por calor.

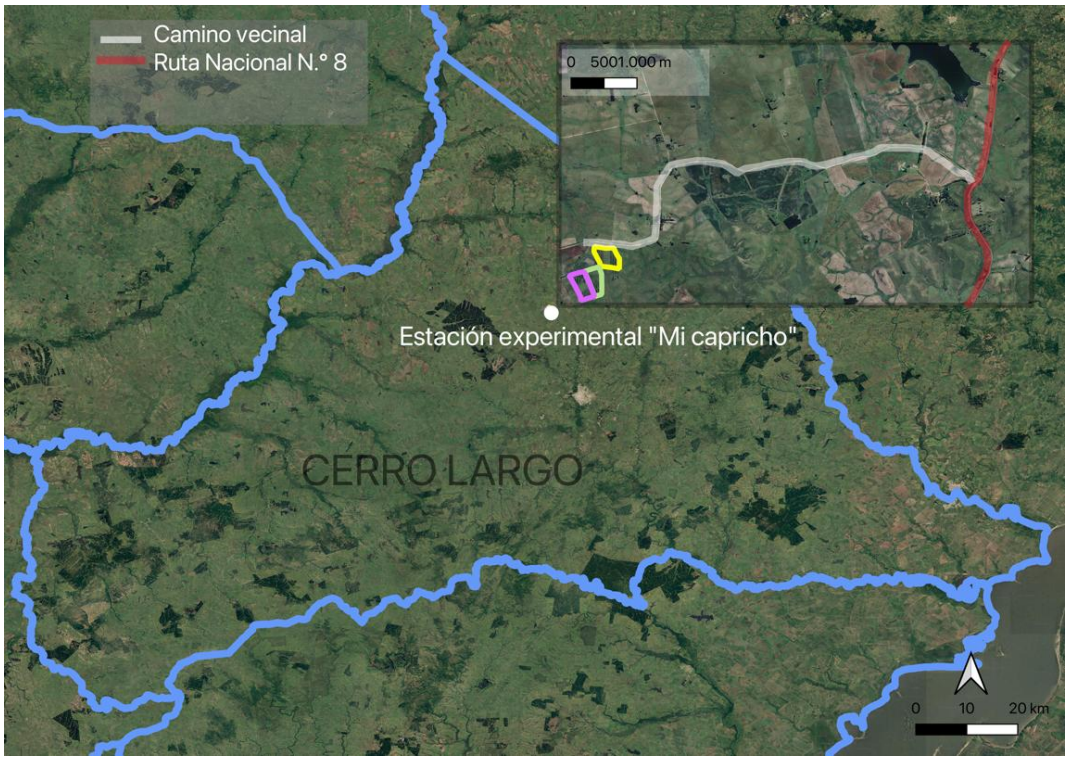
3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en la primera plataforma de investigación, docencia y extensión en sistemas silvopastoriles del Uruguay, coordinada por el polo Agroforestal del CENUR Noreste, Udelar. Esta plataforma se ubica en el predio “Mi capricho”, en el paraje Puntas del Sauce, departamento de Cerro Largo. El sitio se localiza a aproximadamente 28 kilómetros de la ciudad de Melo, accediendo por la ruta nacional N°8 hacia el norte y luego por un camino vecinal hacia el oeste, con las coordenadas geográficas 32°11′04″ S, 54°13′51″ O. En la figura 2 se presenta la ubicación en el territorio de la mencionada plataforma.

Figura 2

Ubicación del sitio de estudio



Nota. Elaborado con base en imagen satelital de Google Satellite (Google, 2026) y cartografía de *Departamentos del Uruguay* de la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay (IDE) (Infraestructura de Datos Espaciales [IDE] y Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información y del Conocimiento [AGESIC], 2020), mediante QGIS Desktop (versión 3.34) (QGIS development team, 2024).

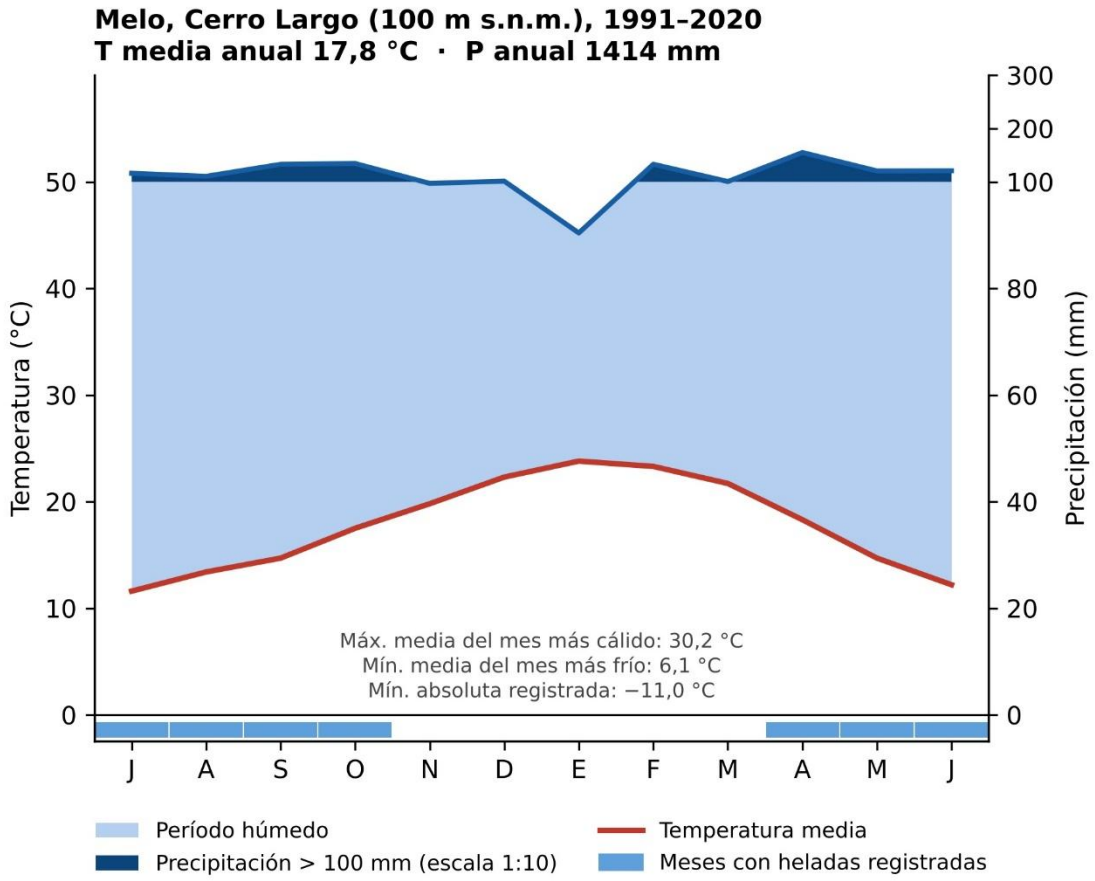
El clima de la región es subtropical húmedo (Cfa), según la clasificación de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018). Para su caracterización se utilizaron las normales climatológicas 1991–2020 de la estación meteorológica Melo (32°22′ S, 54°11′ O; 100 m s.n.m.), ubicada a unos 21 km en línea recta del sitio de estudio (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.; World Meteorological Organization [WMO], 2023). La temperatura media anual es de 17,8 °C, con medias mensuales que varían entre 11,6 °C en julio y 23,8 °C en enero. La precipitación media anual es de 1414 mm y se distribuye

de forma relativamente homogénea a lo largo del año, con un máximo en abril (155 mm) y un mínimo en enero (90 mm). La humedad relativa media anual es de 75 %, con valores máximos en junio (81 %) y mínimos en diciembre y enero (69 %) (Castaño et al., 2011).

En la Figura 3 se presenta el diagrama climático de Walter-Lieth de la estación. La curva de precipitación se mantiene por encima de la de temperatura durante todo el año, por lo que no se identifica un período seco según este criterio, y en la mayoría de los meses la precipitación supera los 100 mm. Esto no excluye la ocurrencia de déficits hídricos en el suelo durante el verano, asociados a la elevada evapotranspiración estival (Fedrigo et al., 2024). En el registro histórico de la estación se observaron temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0 °C entre abril y octubre, lo que indica riesgo de heladas durante ese período.

Figura 3

Diagrama climático de Walter-Lieth de la estación meteorológica Melo, Cerro Largo, Uruguay (1991–2020)

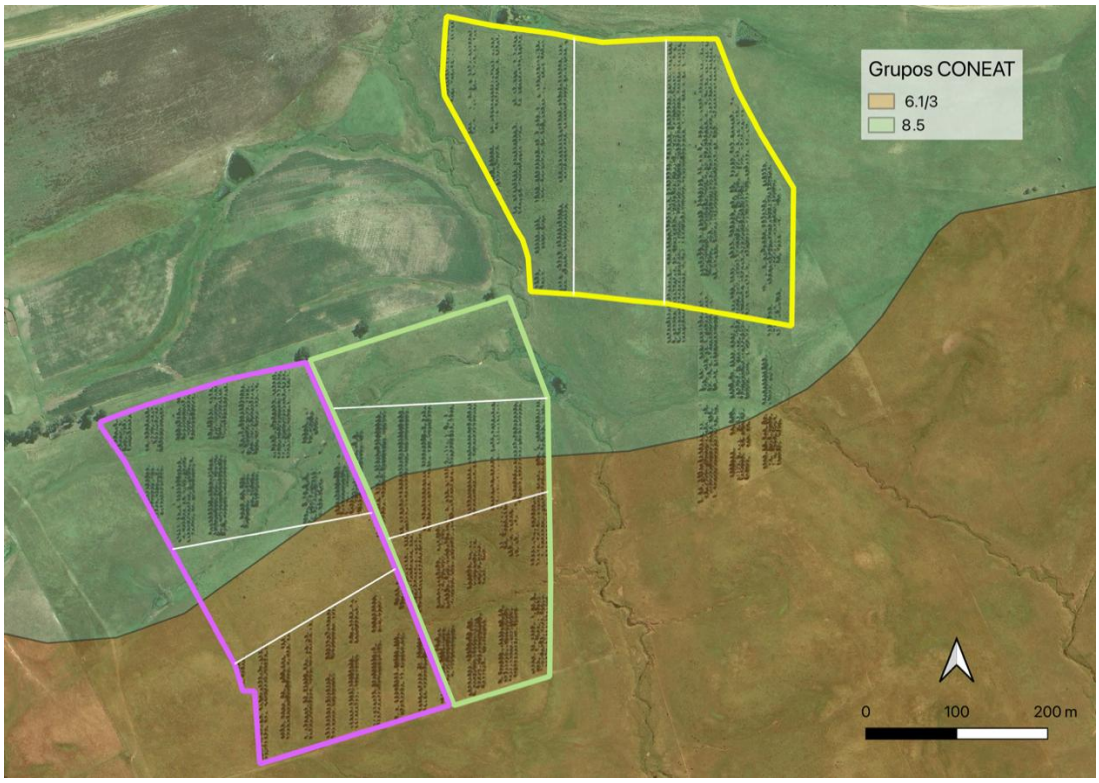


Nota. La línea roja representa la temperatura media mensual y la línea azul, la precipitación media mensual (escala 10 °C = 20 mm). El área celeste indica el período húmedo y el área azul oscuro, las precipitaciones mensuales superiores a 100 mm (escala reducida 1:10). Las barras bajo el eje horizontal señalan los meses con temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0 °C (registros 1937–2020). Elaborado con base en datos de INUMET (s.f.) y WMO (2023).

Según MGAP (2020), los suelos del área de estudio corresponden a los grupos CONEAT 6.1.3 y 8.5 (Figura 4) caracterizados por presentar relieves de colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes, con pendientes que varían entre 5 y 14 %. En el grupo 6.1.3, predominan los Litosoles Subéutricos Melánicos, de fertilidad media y buen drenaje, asociados a Brunosoles Éutricos Lúvicos, ubicados en las partes bajas de laderas y caracterizados por presentar alta fertilidad. Por su parte, en el grupo 8.5, el material geológico está constituido por areniscas rojas de la Formación Yaguarí o por areniscas redepositadas sobre éstas. Los suelos dominantes corresponden a Luvisoles Melánicos Albicos (praderas arenosas), moderadamente profundos, imperfectamente drenados y de muy baja fertilidad; asociados a Luvisoles Úmbrios Albicos, muy profundos y de fertilidad extremadamente baja. Ambos grupos presentan vegetación de pradera estival y se destinan mayoritariamente a uso pastoril, con índices de productividad de 83 y 105, respectivamente. En la figura 4 se presenta la distribución de los distintos grupos de suelos CONEAT en el diseño de bloques de la plataforma.

Figura 4

Grupos CONEAT del área de estudio.



Nota. Elaborado con base en imagen satelital de Google Satellite (Google, 2026) y cartografía CONEAT del MGAP (s.f.), mediante QGIS Desktop (versión 3.34) (QGIS development team, 2024).

3.2 Descripción del diseño experimental

La plataforma experimental abarca una superficie total de 30,24 ha plantada con *E. grandis* de origen seminal en la primavera de 2020. El componente arbóreo se orienta a la producción de madera para transformación mecánica, con un turno final de 15 años.

El ensayo incluye tres tratamientos dispuestos en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 3 repeticiones (B1, B2, B3) (Figura 5). Los tratamientos

corresponden a un sistema silvopastoril con filas dobles de árboles (2F), un sistema silvopastoril con filas cuádruples (4F) y un tratamiento control sin componente arbóreo. Las principales características de cada tratamiento se presentan en la Tabla 1.

En todos los casos, las filas se orientan en sentido norte-sur y el estrato herbáceo corresponde a campo natural. Los bloques se definieron considerando la similitud de la topografía y de las condiciones generales del sitio entre las unidades experimentales.

Tabla 1

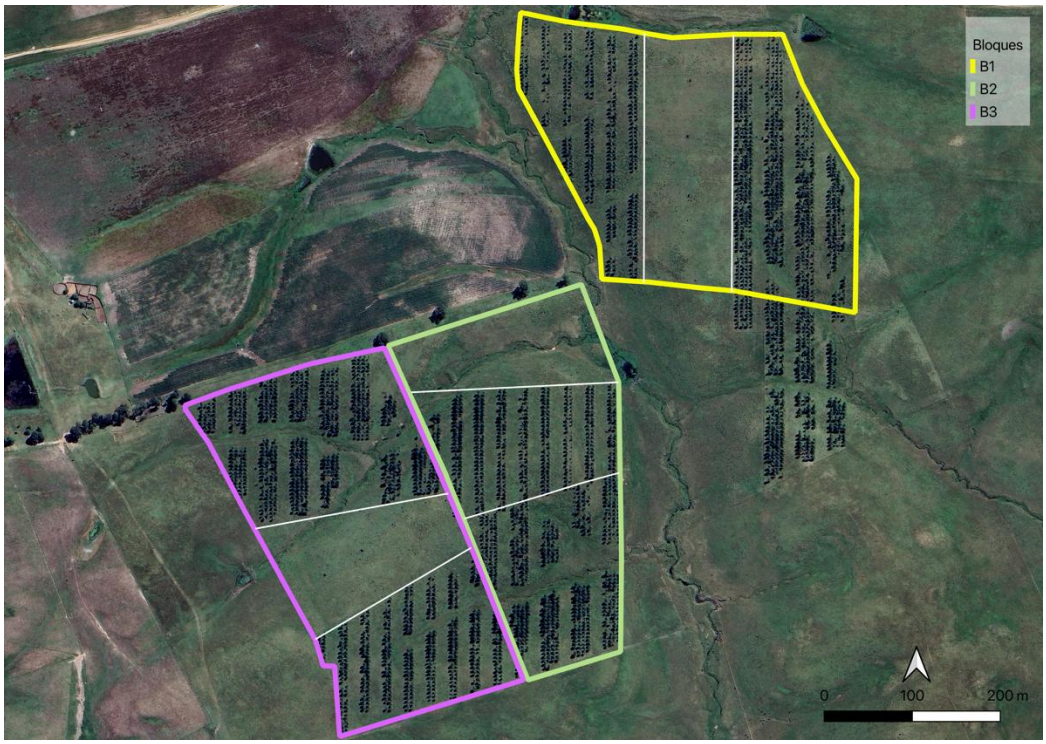
Características de los tratamientos evaluados

Tratamiento	Disposición	Densidad inicial (árboles ha^{-1})	Superficie (ha)
2F	Filas dobles	160	9,92
4F	Filas cuádruples	229	11,25
Control	Sin árboles	0	9,07

Nota. Los tratamientos 2F y 4F presentan un espaciamiento de 5 m entre árboles y entre filas, con un callejón de 20 m entre las hileras de árboles.

Figura 5

Distribución espacial de los bloques experimentales (B1- amarillo, B2 - verde y B3 - violeta)



Nota. Elaborado con base en imagen satelital de Google Satellite (Google,2026), mediante QGIS Desktop (versión 3.34) (QGIS development team 2024).

3.3 Datos de inventario

Para el presente estudio se utilizaron datos provenientes de tres inventarios realizados mediante censo en los años 2023, 2024 y 2025. Dichos relevamientos fueron

efectuados con anterioridad al desarrollo de este trabajo (V. Benitez, comunicación personal, febrero 2026).

El inventario correspondiente al año 2023 se llevó a cabo durante el otoño de ese año, registrándose variables dendrométricas tales como la altura total (ht) y el diámetro a la altura del pecho (DAP; medido a 1,30 m del suelo), empleando una pértiga telescópica y una cinta diamétrica, respectivamente. En total, se midieron y registraron 3.258 árboles en el ensayo.

El inventario de 2024 se realizó en otoño, siguiendo una metodología similar en cuanto a las variables relevadas. En este caso, la altura total fue determinada mediante un hipsómetro Vertex IV, mientras que el DAP se midió con cinta diamétrica. Se registraron 3.131 árboles, excluyéndose 115 del análisis por presentar condiciones tales como quiebre, caída, estado seco, ausencia o muerte.

El relevamiento correspondiente a 2025 se llevó a cabo siguiendo la misma metodología empleada en 2024. En total, se registraron 2. 867 árboles, de los cuales 1.223 correspondieron al tratamiento 2F y 1.644 al tratamiento 4F. En comparación con el inventario anterior, se registró una disminución neta de 264 individuos, principalmente por la mortalidad causada por ataque de terneras y la acción del viento. Para el análisis, se excluyeron aquellos árboles que presentaban condiciones tales como quiebre, caída, estado seco, ausencia o muerte.

En todos los casos se excluyeron de los análisis aquellos árboles que no cumplían las condiciones adecuadas para su medición, siguiendo criterios consistentes entre inventarios.

A partir de los datos obtenidos en campo se calcularon variables derivadas relacionadas con la estructura y productividad del componente arbóreo. Estas incluyeron el área transversal (g), correspondiente a la sección del fuste a 1,30 m de altura, el volumen individual aparente (v), estimado como el volumen de un cilindro cuyo diámetro corresponde al DAP y que representa una aproximación al volumen del árbol, no al volumen comercial, el área basal por hectárea (AB) y el volumen aparente por hectárea (V). Para el cálculo del área basal y del volumen aparente por hectárea se utilizaron las densidades iniciales de plantación de cada tratamiento. Las ecuaciones utilizadas se presentan en la Tabla 2.

Las variables DAP y ht fueron consideradas para los tres inventarios con el objetivo de evaluar la dinámica de crecimiento en área basal de los árboles, mientras que las variables estructurales de copa fueron analizadas únicamente para el año 2025. La selección de los árboles para la mensura de la copa se realizó siguiendo la metodología propuesta en el estudio previo (Sanchis Cooper, 2025), basada en la estratificación de los individuos en terciles a partir del DAP, con el objetivo de obtener una muestra representativa de la variabilidad de la población.

En los árboles seleccionados para la mensura de las copas registraron las siguientes variables: diámetro de copa (dc), longitud de copa viva (lcv), porcentaje de copa (PC), área de copa (Ac), y volumen de copa (Vc).

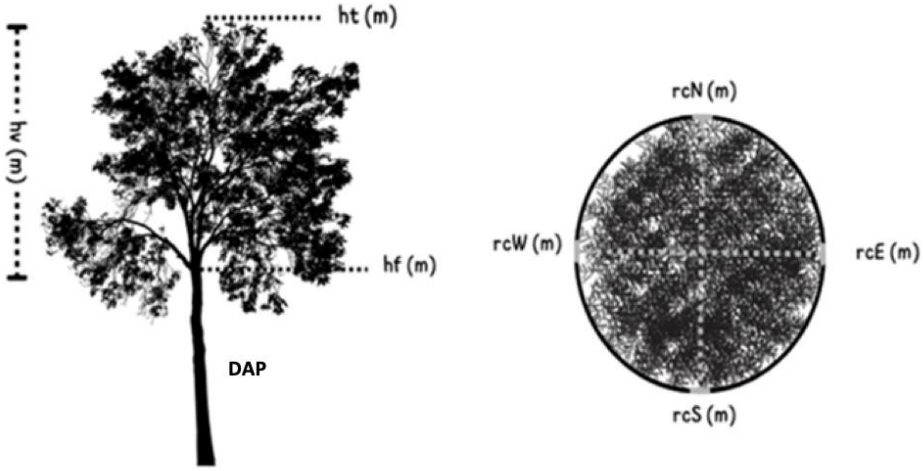
El diámetro de la copa se determinó a partir de la medición de cuatro radios correspondientes a la proyección de la copa sobre el suelo: dos en el sentido de la fila N-S y dos perpendiculares a ella, en sentido E-O. (Figura 6)

Para la estimación de la lcv, se midió la altura desde la base del fuste hasta la primera rama viva, utilizando hipsómetro. Posteriormente, se calculó el PC como la

relación entre la longitud de copa viva y la altura total del árbol. El área de copa se estimó a partir del radio promedio de copa y el volumen de copa se calculó asumiendo una geometría paraboidal. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de estas variables también se presentan en la tabla 2.

Figura 6

Variables dendrométricas y de copa utilizadas en el estudio



Nota. La proyección de la copa muestra los radios medidos en las direcciones norte (rcN), sur (rcS), este (rcE) y oeste (rcW).

Tabla 2

Ecuaciones utilizadas para el cálculo de las variables dendrométricas y de copa

Variable	**Ecuación**
g (m^2)	$g= (\pi/4) * DAP^2$
v (m^3)	v= g * ht
AB (m^2/ha)	AB= g * N
V (m^3/ha)	V= v * N
lcv (m)	lcv= ht- h1erv
PC (%)	PC= (lcv/ht) * 100
Ac (m^2)	$Ac= \pi * (r\,promedio)^2$
Vc (m^3)	$Vc= ½ * \pi * r^2 * lcv$

Nota. h1erv = altura hasta la primera rama viva; r = radio promedio de copa; N = número de árboles por hectárea. El DAP se expresa en centímetros y se convirtió en metros para el cálculo de g.

3.4 Evaluación del microclima

Las variables microclimáticas fueron registradas entre el 21 de diciembre de 2024 y el 20 de diciembre de 2025 mediante sensores automáticos instalados en la plataforma experimental. Se registraron temperatura del aire (T, °C) y humedad relativa del aire (HR, %), mediante sensores HOBO Pro v2 External Temperature/Relative Humidity Data Logger (U23-002; Onset Computer Corporation). Los sensores fueron programados para realizar registros automáticos con frecuencia horaria durante todo el período de monitoreo.

Los sensores fueron instalados en posiciones representativas de cada tratamiento. En las unidades experimentales con componente arbóreo se dispusieron sensores en dos posiciones de muestreo: el centro del callejón y el centro de la entrefila, tanto en 2F como en 4F. En el tratamiento control se instaló un sensor en un área sin cobertura arbórea. Las mediciones se realizaron en los tres bloques del diseño experimental, con un total de 15 unidades de medición. Los sensores fueron montados a una altura aproximada de 1,90 m sobre el nivel del suelo. Los registros obtenidos fueron almacenados mediante data-loggers ZL6 y posteriormente exportados para su procesamiento y análisis.

A partir de la base de datos original se realizó un proceso de depuración de datos para identificar y corregir valores inconsistentes. En el caso de HR, se excluyeron los registros fuera del rango fisícamente posible para esta variable, considerándose inválidos los valores inferiores a 20% y superiores a 100%. Asimismo, se identificaron períodos puntuales en los que algunos sensores no registraron información de T y/o HR debido a fallas operativas o interrupciones en el monitoreo. Estos registros faltantes fueron conservados como valores ausentes (NA) y no fueron considerados en los análisis posteriores.

Los datos fueron agrupados por fecha, tratamiento y bloque para obtener valores medios diarios de T y HR. Con el fin de evaluar la variación estacional, los registros fueron clasificados en verano (21 de diciembre al 20 de marzo), otoño (21 de marzo al 20 de junio), invierno (21 de junio al 20 de setiembre) y primavera (21 de setiembre al 20 de diciembre). Asimismo, los datos se agruparon según el período del día, considerándose como diurno el intervalo comprendido entre las 07.00 y las 18.59 h, y como nocturno el comprendido entre las 19.00 y las 06.59 h.

3.5 Análisis estadístico

El análisis de las variables en estudio se realizó utilizando el software estadístico R versión 4.3.3, mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE) RStudio versión 2023.12.1. Las variables dendrométricas de fuste y copa se analizaron mediante modelos lineales asociados a un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA), mientras que las variables microclimáticas se analizaron mediante modelos lineales mixtos, considerando la estructura de bloques y de las unidades experimentales.

3.5.1 Variables dendrométricas de fuste y copa

Para las variables dendrométricas del fuste correspondientes a los inventarios de 2023, 2024 y 2025, así como para las variables de copa medidas en 2025, se realizó un análisis descriptivo y posteriormente se evaluaron las diferencias entre los tratamientos silvopastoriles 2F y 4F mediante modelos lineales asociados a un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA), considerando tratamientos y bloques como factores.

Para DAP y altura total, además, se realizó un análisis conjunto de las tres edades de evaluación, considerando como factores el tratamiento, la edad y el bloque, e incluyendo la interacción entre tratamiento y edad. La edad se consideró como un factor con tres niveles correspondientes a 2,5 años (2023), 3,6 años (2024) y 5 años (2025).

Para cada combinación de bloque, tratamiento y edad se calculó el valor promedio de DAP y altura total, obteniéndose 18 observaciones para cada variable (3 bloques x 2 tratamientos x 3 edades). De esta manera, la inferencia estadística se realizó considerando como unidad experimental la combinación bloque x tratamiento x edad, evitando considerar los individuos como réplicas independientes.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \alpha_k + (\tau\alpha)_{ik} + \varepsilon_{ijk} \qquad (1)$$

donde:

Y_{ijk}: valor promedio de DAP o altura observada para el i-ésimo tratamiento, j-ésimo bloque y k-ésima edad.

μ: media general;

τ_i: efecto fijo del i-ésimo tratamiento;

β_j: efecto del j-ésimo bloque;

α_k: efecto fijo de la k-ésima edad;

$(\tau\alpha)_{ik}$: interacción entre tratamiento y edad;

ε_{ijk}: error experimental aleatorio que se supone con distribución normal, media cero y varianzas iguales e independientes.

El ajuste de los modelos se realizó mediante la función *lm*() del paquete stats de R. Posteriormente se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos del bloque, tratamiento, edad y de la interacción tratamiento x edad. Asimismo, se estimaron medias ajustadas mediante la función *emmeans* () del paquete *emmeans* y se realizaron comparaciones múltiples entre edades mediante la prueba de Tukey.

3.5.2 Variables microclimáticas

Para las variables microclimáticas T y HR, los análisis se realizaron utilizando los valores medios diarios obtenidos para cada estación del año y período del día. Se consideraron cinco tratamientos: Callejón 2F, Efila 2F, Callejón 4F, Efila 4F y control.

Se ajustaron modelos lineales mixtos considerando el tratamiento como efecto fijo y la estructura experimental en bloques como efecto aleatorio.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk} \qquad (2)$$

donde:

Y_{ijk}: variable de respuesta observada (T o HR) para la k-ésima observación del i-ésimo tratamiento en el j-ésimo bloque;

μ: media general;

τ_i: efecto fijo del i-ésimo tratamiento;

β_j: efecto aleatorio del j-ésimo bloque;

δ_{ij}: efecto aleatorio de la unidad experimental correspondiente al i-ésimo tratamiento dentro del j-ésimo bloque;

ε_{ijk}: error residual asociado a la k-ésima observación.

Se asumió que los efectos aleatorios asociados a los días y los errores residuales siguieron distribuciones normales, con media cero y varianzas constantes, y que ambos componentes fueron independientes entre sí.

Los modelos fueron ajustados mediante la función *lme*() del paquete *nlme* de R. Posteriormente, se realizaron análisis de varianza para evaluar diferencias entre tratamientos. Cuando correspondió, se estimaron medias ajustadas mediante la función *emmeans*() del paquete *emmeans*, con el fin de realizar la comparación entre tratamientos.

4 RESULTADOS

4.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes

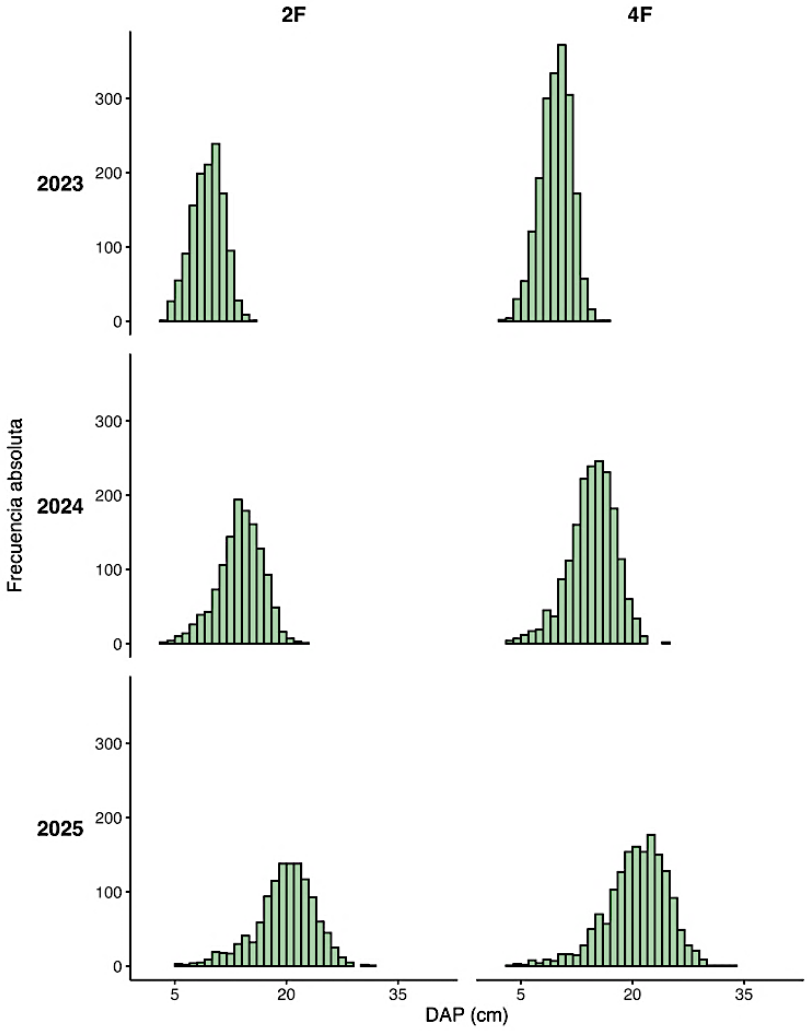
4.1.1 Diámetro a la altura de pecho

4.1.1.1 Análisis descriptivo

En la Figura 7 se presenta la distribución del DAP para los tratamientos 2F y 4F en los años 2023, 2024 y 2025. En ambos tratamientos se observa una distribución unimodal y relativamente simétrica, con una dispersión moderada de los valores. Los valores medios de DAP fueron de 8,33 ± 2,09 cm para 2F y 8,61 ± 2,06 cm para 4F en 2023, de 12,70 ± 2,96 cm y 13,50 ± 3,13 cm en 2024; y de 18,80 ± 3,96 cm y 19,50 ± 4,25 cm en 2025, respectivamente.

Figura 7

Distribución de frecuencias absolutas de DAP para los tratamientos 2F y 4F en 2023, 2024 y 2025



4.1.1.2 Análisis estadístico

En la Tabla 3 se presentan los valores medios, coeficiente de variación (CV) y p-valor para la variable DAP en los tratamientos 2 F y 4F durante los años 2023, 2024 y 2025. En los tres años evaluados no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los p-valor fueron superiores a 0,05 en todos los casos (2023: p = 0,56; 2024: p = 0,15; 2025: p = 0,15). A pesar de la ausencia de diferencias significativas, el tratamiento 4 F presentó de forma consistente valores medios levemente superiores en comparación con 2F en los tres años evaluados.

Tabla 3
ANOVA y medias estimadas para DAP

Variable	Tratamiento	Media ajustada + DE (cm)	CV (%)	p-valor*
DAP 2023	2F	8,29 ± 1,42	17,2	0,56
	4F	8,61 ± 0,21	2,41	
DAP 2024	2F	12,70 ± 1,61	12,7	0,15
	4F	13,58 ± 0,44	3,22	
DAP 2025	2F	18,90 ± 1,70	9,03	0,15
	4F	19,50 ± 1,17	5,97	

Nota. Nivel de significancia (α): 0,05.

Considerando conjuntamente las tres edades de evaluación, se analizó el efecto de la edad sobre el DAP y su interacción con el tratamiento. La edad presentó un efecto significativo sobre el DAP (F= 88,95; p< 0,001), mientras que no se observaron diferencias significativas entre efectos de los tratamientos (p = 0,406). Asimismo, la interacción entre tratamiento y edad no resultó significativa (F = 0,075; p = 0,928), indicando que la evolución del DAP con la edad fue similar entre los tratamientos 2F y 4F. Las comparaciones entre edades confirmaron diferencias significativas entre las tres edades evaluadas, evidenciando un incremento del DAP a lo largo del período de estudio. Los parámetros estimados de los modelos estadísticos utilizados para el análisis del DAP se presentan en la Tabla A1 del Anexo A.

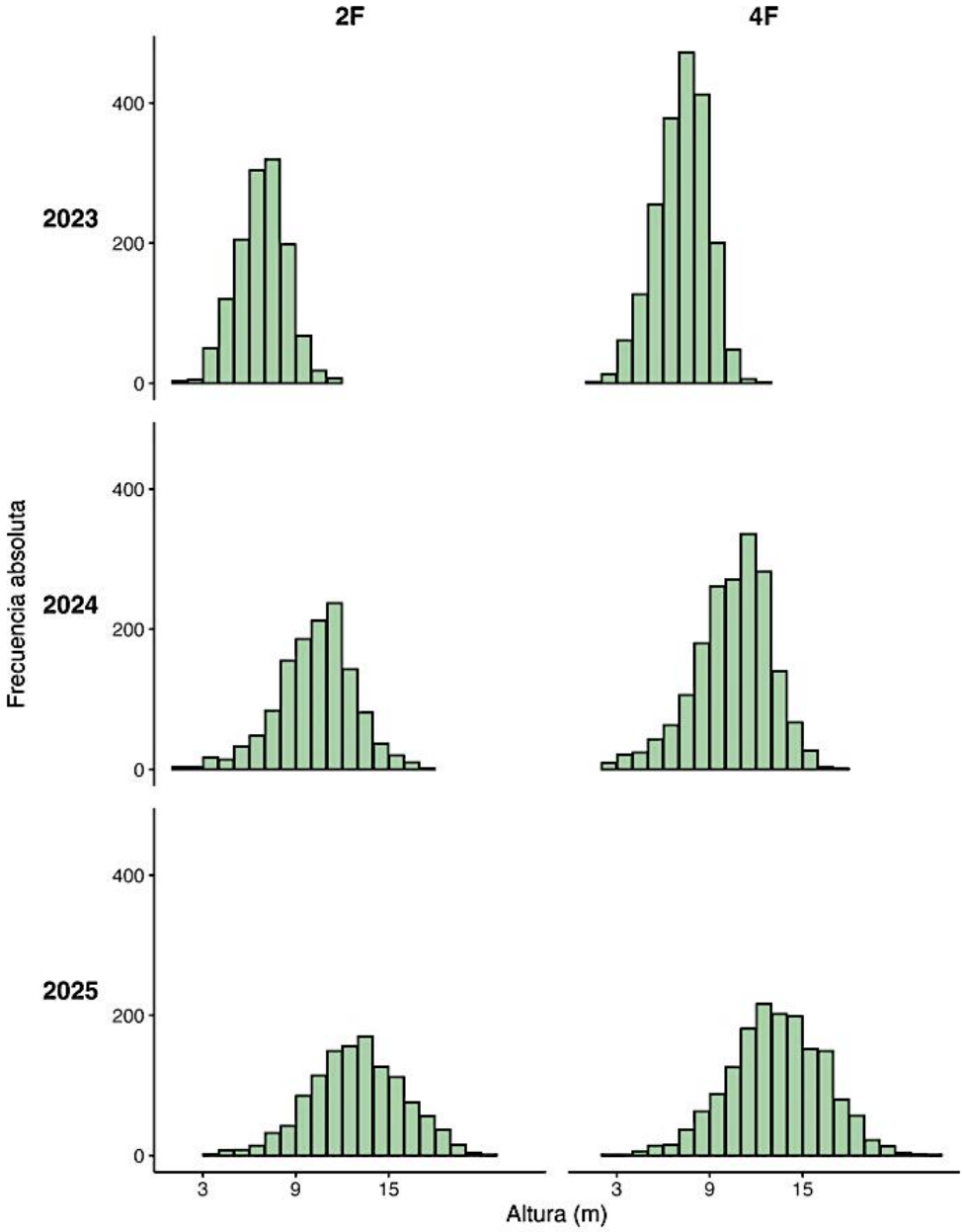
4.1.2 Altura total

4.1.2.1 Análisis descriptivo

En la Figura 8 se presenta la distribución de frecuencias de la altura de los árboles para los tratamientos 2F y 4F en los años 2023, 2024 y 2025. En ambos tratamientos se observa una distribución unimodal y relativamente simétrica, con un desplazamiento progresivo hacia los valores superiores de altura a lo largo del período evaluado. Los valores medios de altura fueron de 6,78 ± 1,58 m para 2F y 7,19 ± 1,64 m para 4F en 2023; de 10,41 ± 5,00 m y 10,47 ± 3,64 m 2024; y de 12,78 ± 3,04 m y 13,13 ± 3,13 m para 2025, respectivamente. En los tres años, las distribuciones de ambos tratamientos presentaron patrones similares.

Figura 8

Distribución de frecuencias absolutas de altura para los tratamientos 2F y 4F en 2023, 2024 y 2025



4.1.2.2 Análisis estadístico

En cuanto a la variable altura (ht) no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ninguno de los años evaluados, los p- valores fueron superiores a 0,05 en todos los casos (2023: p = 0,51; 2024: p = 0,75; 2025: p = 0,33). A pesar de la ausencia de diferencias significativas, el tratamiento 4F presentó consistentemente valores medios ligeramente superiores a 2F en los tres años evaluados.

Tabla 4
ANOVA y medias estimadas para altura total

Variable	Tratamiento	Media ajustada + DE (m)	CV (%)	p-valor*
ht 2023	2F	6,75 ± 0,84	12,5	0,51
	4F	7,20 ± 0,16	2,26	
ht 2024	2F	10,23 ± 1,01	9,83	0,75
	4F	10,45 ± 0,38	3,67	
ht 2025	2F	12,78 ± 2,04	16,0	0,33
	4F	13,46 ± 1,97	14,7	

Nota. Nivel de significancia (α): 0,05.

Considerando conjuntamente las tres edades de evaluación, se analizó el efecto de la edad sobre la altura total y su interacción con el tratamiento. La edad presentó un efecto significativo sobre la altura ($F = 84,96$; $p < 0,001$), mientras que no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,269$). Asimismo, la interacción entre tratamiento y edad no resultó significativa ($F = 0,119$; $p = 0,889$), indicando que la evolución de la altura total con la edad fue similar entre los tratamientos 2F y 4F. Las comparaciones entre edades confirmaron diferencias significativas entre las tres edades evaluadas, evidenciando un incremento de la altura total a lo largo del período de estudio. Los parámetros estimados de los modelos estadísticos utilizados para el análisis de la altura total se presentan en la Tabla A2 del Anexo A.

4.1.3 Área transversal y basal

El área transversal individual presentó un valor promedio de 0,0290 ± 0,0111 m^2 y 0,0314 ± 0,0124 m^2 en 4F. En cuanto al área basal, los valores promedio fueron de 4,64 ± 1,77 m^2/ha en 2F y 7,19 ± 2,84 m^2/ha. Estos valores corresponden a los estadísticos descriptivos de los datos observados, calculados a partir de los individuos evaluados.

A partir del análisis estadístico, el área transversal no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,1041$). Las medias ajustadas por el modelo fueron de 0,0291 m^2 para 2F y 0,0318 m^2 para 4F. En contraste, el área basal presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,0008$), con medias ajustadas de 4,65 m^2/ha para 2F y 7,28 m^2/ha para 4F (Tabla 5).

Tabla 5
Medias ajustadas y significancia estadística para g y AB

	Área transversal (m^2)		Área basal (m^2/ha)	
Tratamiento	**Media**	**p-valor**	**Media**	**P-valor**
2F	0,0291 ± 0,005	0,1041	4,65 ± 0,802	0,0008
4F	0,0318 ± 0,004		7,28 ± 0,815	

Nota. Nivel de significancia (α): 0,05

Los parámetros estimados de los modelos estadísticos para el área transversal y el área basal se presentan en las Tablas A3 y A4 del Anexo A.

4.1.4 Volumen aparente

El volumen aparente individual presentó un valor promedio de 0,397 ± 0,215 m^3/árbol en 2F y de 0,438 ± 0,236 m^3/árbol en 4F. En cuanto al volumen aparente por hectárea, los valores promedios fueron de 63,6 ± 34,3 m^3/ha en 2F y 100,0 ± 54,1 m^3/ha en 4F. Estos valores corresponden a los estadísticos descriptivos de los datos observados, calculados a partir de los individuos evaluados.

A partir del análisis estadístico, el volumen aparente individual no presentó diferencias significativas entre tratamientos (p = 0,1473). Las medias ajustadas por el modelo fueron de 0,397 m^3/árbol para 2F y 0,454 m^3/árbol para 4F. En contraste, el volumen aparente por hectárea presentó diferencias significativas entre tratamientos (p = 0,0047), con medias ajustadas de 63,6 m^3/ha para 2F y 103,9 m^3/ha para 4F (Tabla 6).

Tabla 6
Medias ajustadas y significancia estadística para v y V

	Vol. aparente (m^3)		Vol. aparente (m^3/ha)	
Tratamiento	**Media**	**p-valor**	**Media**	**P-valor**
2F	0,397 ± 0,122	0,1473	63,6 ± 19,4	0,0047
4F	0,454 ± 0,100		103,9 ± 22,9	

Nota. Nivel de significancia (α): 0,05.

Los parámetros estimados de los modelos estadísticos para el volumen aparente individual y el volumen por hectárea se presentan en las Tablas A5 y A6 del Anexo A.

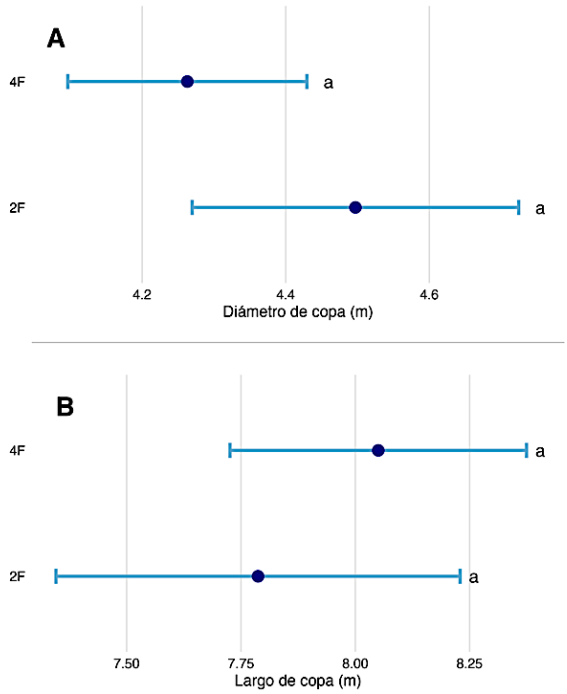
4.1.5 Parámetros dendrométricos de copa

En la Figura 9 se presentan las medias ajustadas e intervalos de confianza correspondientes al diámetro y largo de copa para los tratamientos 2F y 4F. El diámetro de copa presentó un valor promedio superior en el tratamiento 2F en comparación con 4F (Figura 9A). Sin embargo, los intervalos de confianza se superpusieron y el análisis de comparación de medias arrojó un valor de p= 0,1052. Por otro lado, el largo de copa presentó un valor promedio superior en el tratamiento 4F respecto a 2F (Figura 9B). No obstante, los intervalos de confianza también se superpusieron y el análisis de comparación de medias arrojó un valor de p= 0,372.

En la Figura 10 se presentan las medias ajustadas e intervalos de confianza correspondientes al porcentaje de copa, área de copa y volumen de copa para los tratamientos 2F y 4F. El porcentaje de copa presentó un valor promedio superior en el tratamiento 2F respecto a 4F, mientras que el área de copa también mostró valores promedio superiores en 2F. Por su parte, el volumen de copa presentó valores promedio mayores en el tratamiento 4F (Figura 10). En las tres variables, los intervalos de confianza se superpusieron y el análisis de comparación de medias arrojó valores de p mayores a 0,05 (p = 0,529 para porcentaje de copa, p = 0,209 para área de copa y de p = 0,681 para volumen de copa).

Figura 9

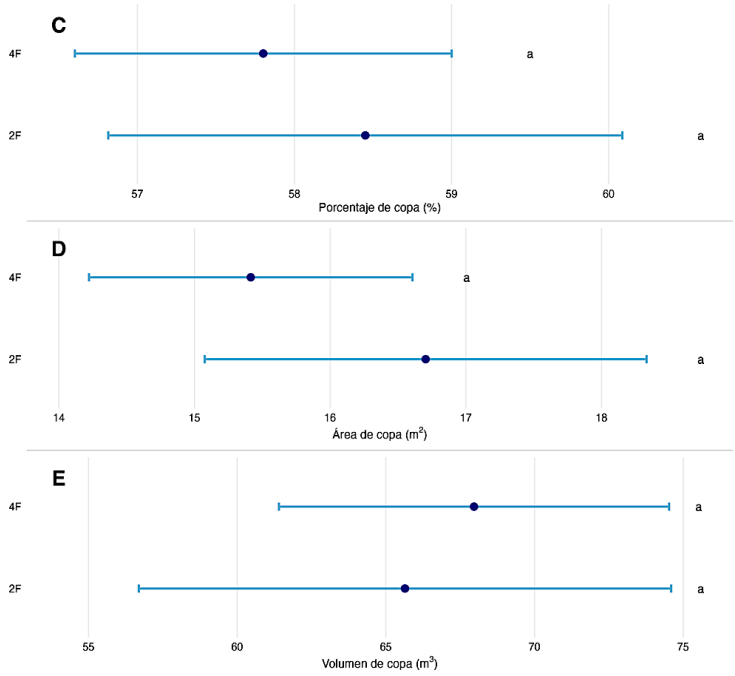
Medias ajustadas e intervalos de confianza para diámetro y largo de copa



Nota. Los puntos representan las medias ajustadas y las barras horizontales corresponden a los intervalos de confianza al 95%. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos.

Figura 10

Medias ajustadas e intervalos de confianza para porcentaje, área y volumen de copa



Nota. Los puntos representan las medias ajustadas y las barras horizontales corresponden a los intervalos de confianza al 95%. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos.

Los parámetros estimados de los modelos estadísticos para las variables de copa se presentan en las Tablas A7, A8, A9, A10 y A11 del Anexo A.

4.2 Condiciones microclimáticas

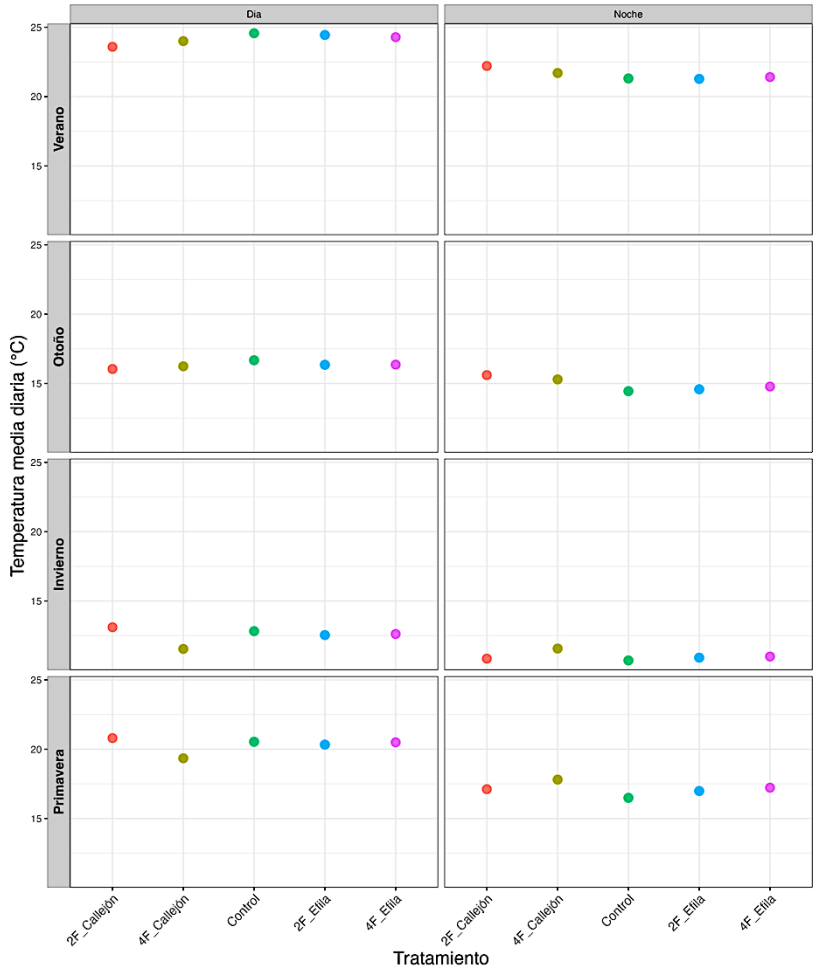
4.2.1 Temperatura del aire

4.2.1.1 Análisis descriptivo

La temperatura media diaria presentó una marcada variación estacional, registrándose los valores más elevados durante el verano y los más bajos durante el invierno (Figura 11). Asimismo, se observó un patrón consistente entre períodos, con temperaturas más altas durante el día que durante la noche en todas las estaciones evaluadas. En términos generales, las diferencias entre tratamientos dentro de cada combinación estación y período fueron reducidas, observándose valores de temperatura media diaria similares, acompañaron al control (punto verde).

Figura 11

Temperatura media diaria (°C) según tratamiento, estación del año y período del día



Nota. Los puntos representan la T media de cada tratamiento.

4.2.1.2 Análisis estadístico

El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre tratamientos para la temperatura media diaria en ninguna de las estaciones ni período evaluados. Todos los p-valores fueron superiores a 0,05. Los parámetros estimados de los modelos estadísticos para la temperatura media se presentan en la Tabla A12 del Anexo A.

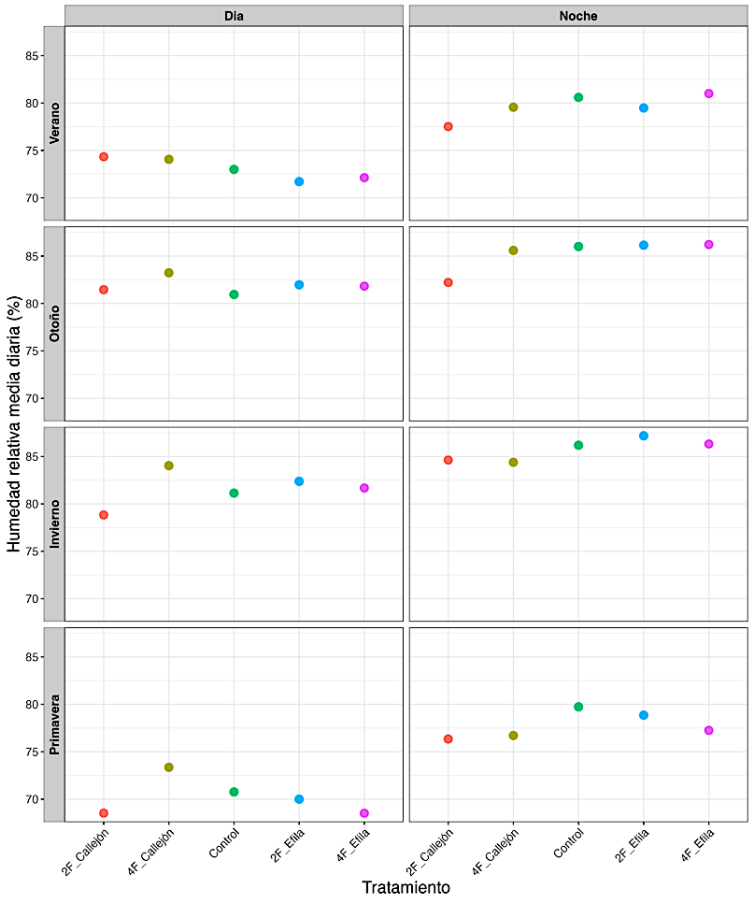
4.2.2 Humedad relativa del aire

4.2.2.1 Análisis descriptivo

La humedad relativa media diaria presentó variaciones estacionales y entre períodos de evaluación (Figura 12). Los mayores valores de humedad relativa se registraron durante el invierno, mientras que los menores se observaron durante la primavera y verano. Asimismo, se observó valores de humedad relativa más elevados durante la noche que durante el día en todas las estaciones evaluadas.

Figura 12

Humedad relativa media diaria (%) según tratamiento, estación del año y período del día



Nota. Los puntos representan la HR media de cada tratamiento.

4.2.2.2 Análisis estadístico

El análisis de varianza indicó diferencias significativas entre tratamientos únicamente durante invierno-día (p-valor= 0,026) (Tabla 7). En las restantes combinaciones de estación y período no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos (p-valor>0,05), observándose valores de humedad relativa similares entre los distintos tratamientos. Los parámetros estimados de los modelos estadísticos para la humedad relativa se presentan en la Tabla A13 del Anexo A.

Tabla 7
ANOVA para la HR media diaria por estación y período

Estación	Período	F	p-valor
Primavera	Día	3,4709	0.0725
Primavera	Noche	0,6489	0.6455
Verano	Día	1,9126	0.2132
Verano	Noche	0,1734	0.9451
Otoño	Día	1,4440	0.3144
Otoño	Noche	0,4740	0.7543
Invierno	**Día**	**5,4208**	**0.0262**
Invierno	Noche	0,2980	0.8705

Las medias ajustadas oscilaron entre 78,8% y 83,9% (Tabla 8). El contraste entre los arreglos 4F y 2F resultó significativo (p=0,028), indicando que los tratamientos 4F presentaron una humedad relativa media aproximadamente 2,17 puntos porcentuales superior a la observada en los tratamientos 2F. Los restantes contrastes no resultaron significativos (p>0,05). (Tabla 9).

Tabla 8
Medias ajustadas de HR (%) para invierno día

Tratamiento	Humedad (%)
2F_Callejón	78.8
2F_Efila	82.4
4F_Callejón	83.9
4F_Efila	81.7
Control	81.8

Tabla 9
Contrastes ortogonales para la HR (%) durante invierno- día

Contraste	Diferencia de HR (puntos porcentuales)	p-valor
Arbolado vs control	-0,08	0,9456
4F vs 2F	2,17	0,0281
Entrefila 4F vs Entrefila 2F	-0,71	0,5437
Callejones vs control	-0,42	0,7267

5 DISCUSIÓN

5.1 Componente arbóreo

5.1.1 Variables dendrométricas y dasométricas de los fustes

Al evaluar árboles de *E. grandis* de 2 años, establecidos bajo diferentes arreglos silvopastoriles y plantaciones homogéneas, en la región sudoeste de Rio Grande do Sul, Brasil, Ribaski et al. (2005) no encontraron diferencias significativas en DAP y altura durante las etapas iniciales de desarrollo, atribuyendo este comportamiento a que, en rodales jóvenes, las diferencias en densidad y disposición espacial aún no se reflejan en el crecimiento individual de los árboles. En concordancia con estos resultados, Barrios Miller y Pippo Arbelo (2025) no encontraron diferencias significativas en el DAP de *E. grandis* entre arreglos de fila simple y triple fila a los 1,5 años, en ensayos silvopastoriles realizados en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt, Cerro Largo, Uruguay. Sin embargo, en una evaluación posterior del mismo ensayo, a los 3 años, Blum Lecchini y Santín Corvo (2026) encontraron diferencias en el crecimiento de *E. grandis* entre determinadas configuraciones espaciales. En particular, el arreglo de triple fila con callejón de 9 m alcanzó un DAP medio de 9,54 cm y una altura total de 9,36 m, frente a 8,78 cm y 8,38 m, respectivamente, en el arreglo de fila simple con el mismo ancho de callejón. Estos resultados, junto con el aumento del DAP y la altura total con la edad observado en el presente estudio, son consistentes con la dinámica de crecimiento de las plantaciones de *Eucalyptus,* donde estas variables se incrementan progresivamente durante las primeras etapas del ciclo del rodal (Mora & Venturino, 2023). En conjunto, estos resultados sugieren que la ausencia de diferencias observadas entre 2F y 4F podría estar relacionada con la etapa de desarrollo evaluada, y que el efecto de la configuración espacial podría hacerse más evidente con el desarrollo del sistema.

De forma complementaria, Ferreira et al. (2014) observaron que los espaciamientos más amplios promovieron un mayor crecimiento diamétrico en clones de *E. urophylla* S.T. Blake *x E. grandis* (urograndis), evaluados entre 3 y 6 años en Avaré, São Paulo, Brasil. Desde los 3 años, las plantas establecidas en el espaciamiento más reducido (3 x 1 m) presentaron menores valores de DAP que aquellas de los espaciamientos más amplios, registrándose diferencias significativas en varias de estas comparaciones. Los autores relacionaron este comportamiento con una mayor competencia por agua, luz y nutrientes en los espaciamientos más reducidos y señalaron que el DAP presentó una respuesta más marcada a las variaciones de espaciamiento que la altura. Neto (2022), al evaluar eucalipto-urograndis en dos modelos de plantación silvopastoril en Paranaíta, Mato Grosso, Brasil, encontró mayores valores de DAP y altura en el arreglo de líneas simples y puras. La evaluación se realizó a los 58 meses de edad en el arreglo de líneas simples y puras y a los 46 meses en el arreglo de líneas simples de eucalipto-urograndis asociado con mogno-africano. El autor también observó mayor área de copa en el arreglo de líneas simples sólo con urograndis. En concordancia con lo anterior, Muñoz et al. (2005), trabajando con *Eucalyptus nitens* (H. Deane & Maiden) Maiden en un ensayo ubicado en las cercanías de Los Álamos, VIII Región, Chile, y evaluado entre los 6 y 14 años, observaron que a los 14 años los tratamientos más intensamente raleados presentaron mayores crecimientos en diámetro y volumen por árbol. Estos antecedentes indican que el DAP puede responder a modificaciones en la competencia entre árboles; sin embargo, la ausencia de diferencias entre 2F y 4F sugiere que las diferencias en la configuración de los tratamientos no fueron suficientes para generar un contraste en la competencia que se refleja en el crecimiento diamétrico.

Sin embargo, no todos los estudios coinciden con estos resultados. Flumignan et al. (2023), al evaluar durante 22 meses el crecimiento dimétrico de eucalipto-urograndis, desde los 4 años y 9 meses hasta los 6 años y 7 meses de edad, en sistemas agroforestales en Ponta Porã, Brasil, observaron que el crecimiento en diámetro fue mayor en los sistemas agroforestales que en la plantación forestal y que, dentro de los sistemas agroforestales, aumentó a medida que se incrementó la distancia entre filas de eucalipto. En contraste, en el presente estudio no se observaron diferencias significativas en el DAP entre los tratamientos 2F y 4F. Esta diferencia podría estar relacionada con las características y condiciones de los ensayos, ya que, mientras Flumignan et al. (2023) evaluaron sistemas con diferentes distancias entre las filas de eucalipto, en el presente estudio ambos tratamientos mantuvieron la misma distancia entre árboles y filas (5 x 5 m), diferenciándose principalmente el número de filas y en la densidad inicial de plantación.

En conjunto, estos antecedentes sugieren que la respuesta del crecimiento individual a cambios en la densidad y disposición espacial de los árboles depende de factores como la edad del rodal, la intensidad de la competencia y las características de cada especie. En este contexto, la ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos 2F y 4F podría indicar que, durante el período evaluado, las diferencias en la estructura de plantación aún no han generado contrastes suficientes en el crecimiento individual de los árboles. Esta interpretación es consistente con lo señalado por Jerez et al. (1999), quienes destacan que la intensidad de las interacciones entre árboles depende tanto de su tamaño como de su disposición espacial. Asimismo, Perrotti (2017) señala que el espaciamiento influye directamente sobre el crecimiento del componente arbóreo. En la misma línea, Magalhães et al. (2006), al evaluar diferentes especies de *Eucalyptus* a los 9,4 años en cuatro espaciamientos de plantación, en la región noroeste de Minas Gerais, Brasil, observaron mayores valores de diámetro y volumen individual en los espaciamientos más amplios. Los autores señalaron que el aumento del espaciamiento disminuyó la competencia intraespecífica y favoreció la disponibilidad de factores de crecimiento durante un período más prolongado. Sin embargo, en el presente estudio no se detectaron diferencias significativas en el área transversal, ni en el volumen aparente individual entre los tratamientos. En consecuencia, las condiciones de competencia a nivel individual habrían sido similares entre tratamientos, lo que contribuiría a explicar la ausencia de diferencias en estas variables.

Pacheco (2013) observó que el área basal y la producción volumétrica por unidad de superficie se encuentran fuertemente influenciadas por la densidad inicial de plantación, registrando los mayores valores en los tratamientos con mayor número de árboles por hectárea. De forma complementaria, Perrotti (2017) destaca que el espaciamiento influye sobre la producción por unidad de superficie, mientras que Magalhães et al. (2006) reportaron una disminución del volumen por hectárea a medida que aumentó el espaciamiento entre árboles. Estos antecedentes coinciden con lo observado en el presente estudio, donde el tratamiento 4F presentó mayores valores de área basal y volumen por hectárea que el tratamiento 2F. Considerando que ambos tratamientos presentaron un crecimiento individual similar, estas diferencias a nivel de rodal podrían atribuirse principalmente a la mayor densidad inicial de plantación del tratamiento 4F (229 árboles ha^{-1}) respecto a la de 2F (160 árboles ha^{-1}), lo que se tradujo en una mayor acumulación de área basal y volumen por unidad de superficie.

5.1.2 Variables de copa

Las variables de copa evaluadas no presentaron diferencias significativas entre tratamientos 2F y 4F. Si bien el diámetro, el área y el porcentaje de copa mostraron valores promedio superiores en el tratamiento 2F, el largo y el volumen de copa fueron levemente superiores en 4F. Sin embargo, estas diferencias no fueron suficientes para evidenciar un efecto significativo del arreglo espacial sobre la arquitectura de copa de los árboles.

La ausencia de diferencias significativas podría estar asociada a que ambos tratamientos mantuvieron la misma distancia entre árboles dentro de la fila (5 m), condición que podría haber generado niveles similares de competencia entre individuos. Diversos autores señalan que el desarrollo de la copa se encuentra estrechamente relacionado con el espacio disponible y el crecimiento individual de los árboles. En este sentido, Pretzsch et al. (2015) reportaron que las dimensiones de la copa son altamente sensibles a la competencia y al espacio de crecimiento disponible para cada individuo. Asimismo, Brosovich Gonzales (2021) encontró una relación lineal altamente significativa entre el diámetro normal y el diámetro de copa en plantaciones de *Eucalyptus*, evidenciando la estrecha asociación existente entre el crecimiento individual de los árboles y el desarrollo de copas. Por lo tanto, la ausencia de diferencias en el DAP observadas entre tratamientos podría haber contribuido a la similitud registrada en las variables de copa evaluadas en el presente estudio.

5.2 Microclima

La temperatura media diaria presentó una marcada variación entre estaciones del año y períodos del día, observándose los valores más elevados durante el verano y los más bajos durante el invierno. Un patrón similar fue reportado por Schinato (2022) en un sistema silvopastoril con *E. grandis* en Uruguay, donde las mayores temperaturas medias del aire se registraron durante el verano (22 °C) y las menores durante el invierno (10 °C). En todas las estaciones evaluadas las temperaturas registradas durante el período diurno fueron superiores a las observadas durante la noche, reflejando la influencia del ciclo diario de radiación sobre las condiciones térmicas del ambiente. En el presente estudio, las diferencias observadas entre estaciones y períodos del día fueron considerablemente mayores que las registradas entre tratamientos dentro de cada combinación estacional, lo que sugiere una mayor influencia de la variabilidad temporal sobre la temperatura del aire que de las diferencias estructurales existentes entre los sistemas evaluados.

A pesar de las diferencias estructurales entre los tratamientos evaluados, no se detectaron diferencias significativas en la temperatura media del aire para ninguna de las estaciones del año ni período analizado. Resultados similares fueron reportados por Schinato (2022), quien observó que la temperatura del aire no fue influenciada por las distintas posiciones evaluadas dentro de un sistema silvopastoril. El autor señaló que, aun durante los períodos de olas de calor, los promedios diarios de temperatura del aire no difirieron entre las posiciones ubicadas bajo cobertura arbórea y aquellas a pleno sol.

Sin embargo, estos resultados difieren parcialmente de los reportados por Fedrigo et al. (2018), quienes observaron temperaturas medias del aire significativamente menores en sistemas forestados respecto a áreas abiertas. Dicho estudio fue realizado en plantaciones de *Pinus taeda* L. con aproximadamente 500 árboles por hectárea y una elevada proporción de cobertura arbórea, condiciones que contrastan con las densidades

iniciales de 160 y 229 árboles por hectárea evaluadas en el presente trabajo. Las diferencias observadas entre estudios podrían estar asociadas a las características estructurales de los sistemas evaluados. Munka (2017) señala que las cubiertas forestales pueden modificar el régimen térmico del aire mediante cambios en la radiación incidente, el desarrollo de follaje y el comportamiento del viento, generando temperaturas máximas menores y temperaturas mínimas mayores respecto a áreas sin árboles. Por otra parte, Viñoles et al. (2017) destacan que la especie arbórea seleccionada, la densidad de plantación y el arreglo espacial del plantío influyen en las modificaciones microclimáticas que ocurren bajo las copas. En este sentido, las menores densidades arbóreas y amplios callejones presentes en el presente estudio podrían haber contribuido a la ausencia de diferencias significativas en la temperatura media del aire entre tratamientos.

En conjunto, los resultados sugieren que, bajo las condiciones estructurales del sistema evaluado, la presencia del componente arbóreo no fue suficiente para modificar la temperatura media diaria del aire. Sin embargo, de acuerdo con lo reportado por otros autores, la ausencia de diferencias significativas en la temperatura media no implica necesariamente la inexistencia de efectos microclimáticos asociados al componente arbóreo. En este sentido, Bahamonde et al. (2009) observaron que los sistemas silvopastoriles pueden modificar variables térmicas como la amplitud térmica diaria y las temperaturas extremas, aun cuando los valores medios de temperatura presentan variaciones reducidas. Por lo tanto, podrían existir efectos sobre componentes del microclima o sobre variables térmicas no evaluadas en este trabajo, como la amplitud térmica y las temperaturas extremas.

La humedad relativa del aire presentó una marcada variación estacional y diaria, registrándose los valores más elevados durante el invierno y los menores durante el verano y la primavera. Un comportamiento similar fue observado por Schinato (2022), quien reportó que los mayores valores de humedad relativa se registraron durante el invierno y los menores durante el verano. En todas las estaciones evaluadas la humedad relativa fue superior durante la noche respecto al período diurno. Este comportamiento es consistente con la estrecha relación existente entre la temperatura y humedad relativa, ya que el aumento de la temperatura incrementa la capacidad del aire para contener vapor de agua, reduciendo los valores de humedad relativa cuando el contenido de vapor permanece constante, mientras que temperaturas más bajas favorecen valores de humedad relativa más elevadas (Schinato, 2022).

Schinato (2022) observó que la humedad relativa no fue claramente influenciada por las distintas posiciones evaluadas dentro de un sistema silvopastoril. De igual forma, Bosi et al. (2020, como se cita en Schinato, 2022) tampoco encontraron diferencias en los promedios estacionales de humedad relativa entre áreas silvopastoriles y condiciones a pleno sol. Estos antecedentes coinciden con lo observado en el presente estudio, donde no se detectaron diferencias significativas en la humedad relativa del aire entre tratamientos para la mayoría de las combinaciones de estación y período evaluadas.

No obstante, durante el período diurno de invierno se observaron diferencias significativas entre las densidades forestales evaluadas. El contraste entre tratamientos indicó que los arreglos de cuatro filas presentaron una humedad relativa 2,17 puntos porcentuales superior a la observada en los arreglos de dos filas. Según Munka (2017), los ambientes bajo cobertura arbórea suelen presentar una humedad relativa superior a la observada en áreas sin árboles, debido a una menor renovación del aire, menor turbulencia y una mayor resistencia aerodinámica a la disipación del vapor de agua. Además, las características estructurales del componente forestal, como la densidad de plantación y el arreglo espacial de los árboles, influyen sobre la magnitud de las

modificaciones microclimáticas generadas bajo el dosel. En concordancia, Fedrigo et al. (2018) señalan que la humedad relativa tiende a ser mayor bajo cobertura arbórea y que la intensidad de estos cambios depende de la estructura del sistema forestal. En este sentido, la mayor densidad arbórea presente en el tratamiento 4F podría haber favorecido condiciones relativamente más húmedas que las observadas en el tratamiento 2F durante el invierno diurno, al generar un microambiente con menor renovación de aire y mayor retención de vapor de agua. Sin embargo, dado que este comportamiento no se observó en el resto de las estaciones y períodos evaluados, los resultados indican que el efecto de la densidad arbórea sobre la humedad relativa fue puntual y podría depender de las condiciones ambientales presentes durante el período de evaluación.

6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el DAP y la altura total aumentaron con la edad durante el período evaluado, sin evidenciar diferencias en su evolución entre los tratamientos 2F y 4F. Asimismo, las variables dendrométricas y dasométricas del fuste, así como las variables de la copa, no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que las diferencias en la densidad inicial de plantación aún no se reflejaron en el crecimiento individual de los árboles. Además, el tratamiento de cuatro filas presentó mayores valores de área basal y volumen por unidad de superficie, atribuibles principalmente al mayor número de árboles por hectárea.

En relación con el microclima de la pastura, los resultados muestran que las diferencias entre tratamientos no generaron respuestas significativas en las variables microclimáticas evaluadas, dado que la temperatura media del aire no presentó diferencias entre tratamientos, mientras que la humedad relativa presentó diferencias únicamente durante el período diurno de invierno. Estos resultados sugieren que una mayor densidad del componente arbóreo puede favorecer condiciones de mayor humedad relativa al generar un microambiente con menor renovación del aire y mayor retención de vapor de agua; sin embargo, este efecto no se manifestó de forma consistente entre las distintas estaciones y períodos evaluados.

En conjunto, los resultados indican que, a la edad evaluada, las diferencias estructurales entre los tratamientos aún no fueron suficientes para generar respuestas consistentes en el crecimiento individual de los árboles ni en las variables microclimáticas evaluadas. En este contexto, el seguimiento de estas plantaciones permitirá determinar si, a medida que avance su desarrollo, las diferencias en la estructura del dosel se traducen en cambios más marcados en el microclima de la pastura.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bahamonde, H. A., Peri, P. L., Martínez Pastur, G., & Lencinas, M. V. (2009). Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antartica* en dos clases de sitio en Patagonia Sur. En P. L. Peri (Comp.), *Actas del Primer Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles* (pp. 289-296). INTA.

Barrios Miller, S., & Pippo Arbelo, R. (2025). *Relaciones hídricas en dos especies de Eucalyptus en sistema silvopastoril* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. https://hdl.handle.net/20.500.12008/50983

Barros Asenjo, S. (2012). El género *Eucalyptus*. *Ciencia e Investigación Forestal*, *18*(3), 75-100. https://doi.org/10.52904/0718-4646.2012.395

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data, 5*, Artículo e180214. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Blum Lecchini, R. A., & Santín Corvo, J. I. (2026). *Desarrollo de modelos de estimación de variables forestales en sistema silvopastoril utilizando métricas LiDAR* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de Corrección Bibliográfica. http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/book/496

Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., McDonald, M. W., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of Australia* (5th ed.). CSIRO.

Boscana, M., & Boragno, L. (2018). Actualidad del sector forestal. En *Anuario OPYPA 2018* (pp. 229-239). MGAP. https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202018/ANUARIO%20OPYPA%202018%20WEB%20con%20vínculo.pdf

Brosovich Gonzales, M. M. (2021). Guía para el manejo de la densidad de plantaciones forestales de *Eucalyptus* en el Municipio Carmen Rivero Torres, Santa Cruz, Bolivia. *Revista Forestal Tropical, 1*(1), 58-75. https://ojs.uagrm.edu.bo/forestal-tropical/article/view/100

Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuentes en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.

Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980–2009*. INIA.

Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social. (2023). *La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible.* https://ceres.uy/admin/uploads/slides/archivo_1699474632.pdf

Dirección General Forestal. (2021). *Cartografía Nacional Forestal 2021*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/CARTOGRAFÍA_%202021_compressed.pdf

Espinosa Bancalari, M., & Muñoz Sáez, F. (2005). *Silvicultura de plantaciones: Apuntes de clases.* Universidad de Concepción. https://www2.udec.cl/~fmunoz/Apuntes_Silvicultura_Plantaciones.pdf

Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., Posse, J. P., Santiago Barro, R., Hernández, J., Mantero, C., Morales Olmos, V., Silveira, E. D., & Viñoles, C. (2018). Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Veterinaria (Montevideo), 54*(209), 20-30. https://doi.org/10.29155/VET.54.209.4

Fedrigo, J. K., Benítez, V., Souza, M. de, Morales, V., Piñeyro, P., Viana, V., Blumetto, O., Pravia, V., Ciganda, V., Cancela, H., Bertoncelli, P., Laufer, G., González Barrios, P., Siri, P., Báez, F., García, L. F., & Viñoles Gil, C. (2024). 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*. Publicación anticipada en línea. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3911569/v1

Feldhake, C. M., & Belesky, D. P. (2009). Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerate* and *Schedonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient. *Agroforestry Systems, 75*(2), 189-196. https://doi.org/10.1007/s10457-008-9175-9

Ferreira, D. H. A. A., Leles, P. S. dos S., Machado, E. C., Abreu, A. H. M. de, & Abilio, F. M. (2014). Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. *Floresta, 44*(3), 431-440. https://doi.org/10.5380/rf.v44i3.32188

Flumignan, D. L., Silva, S. C. R. R. da, Salton, J. C., & Comunello, E. (2023). Diameter growth of eucalyptus trees in agroforestry systems and its relation to air temperature and precipitation. *Agroforestry Systems*, *98*(5), 1195-1209. https://doi.org/10.1007/s10457-023-00936-x

Gómez Pivel, A. (1995). Poda en *Eucalyptus grandis*. En *Jornada Forestal Zona Norte* (pp. 5-11). INIA. https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2325/1/1443218051 0150420.pdf

Google. (2026). [Cerro Largo, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 18 de julio de 2026, de https://www.google.com/maps/@-32.1883548,-54.2286806,1781m/data=!3m1!1 e3!5m1!1e4?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDkyMy4wIKXMDSoASAFQAw% 3D%3D

Grandis: Eucalyptus grandis Hill ex Maid, especie de árbol de uso múltiple en América Central. (1994). CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2 249/Grandis_Eucalyptus_grandis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Infraestructura de Datos Espaciales & Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información y del Conocimiento. (2020). *Departamentos del Uruguay* [Conjunto de datos]. https://visualizador.ide.uy/geonetwork/srv/api/records/8784 19d3-d09d-4ace-a9d7-cc54dd40e6d8

Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Tablas estadísticas.* https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas

Jerez, R. M., Vincent, L., & Moret, A. (1999). Un modelo de competencia para las plantaciones de teca del área experimental de la Reserva Forestal Caparo (Barinas, Venezuela). *Revista Forestal Venezolana, 43*(2), 157-171.

La integración de forestaciones en predios familiares: Resultado de un estudio participativo. (2016). CNFR; Universidad de la República. https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15316/1/Integracion-de-forestaciones-en-predios-familiares-CNFR-2016.pdf

Lima, I. L. de. (2005). *Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de Eucalyptus grandis Hill ex-Maiden* [Disertación doctoral, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20072005-154922/publico/IsraelLima.pdf

Magalhães, W. M., Macedo, R. L. G., Venturim, N., Higashikawa, E. M., & Yoshitani Júnior, M. (2006). Desempenho silvicultural de espécies de *Eucalyptus* spp. em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais. *Floresta e Ambiente, 12*(2), 1-7.

Miguel, F. (2020). Una lupa académica sobre la unión entre la forestación y ganadería. *Revista Forestal*, (27), 16-22. https://www.revistaforestal.uy/wp-content/uploads/2020/09/F27-Silvicultura.pdf

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (s.f.). *Cartografía CONEAT en formato shape*. [Mapa]. https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/CONEAT_1_2023.zip

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2020). *Descripción de Grupos de Suelos CO.N.E.A.T.* https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripción%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEAT_0.pdf

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2025, 27 de octubre). *Resolución N.° 1613/025: Definición, criterios técnicos, evaluación y monitoreo en sistema silvopastoril sostenible en campo natural (SSPECN)*. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/institucional/normativa/resolucion-n-1613025-definicion-criterios-tecnicos-evaluacion-monitoreo

Mora, C., & Venturino, A. (2023). Long-term growth data of plantation-grown *Eucalyptus* established in south-eastern Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, *27*(NE2), Artículo e1272. https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1272

Munka, C. (2017). Microclima en sistemas silvopastoriles. En *I Seminario en Sistemas silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad* (pp. 63-65). Polo Agroforestal.

Muñoz, F., Espinosa, M., Herrera, M. A., & Cancino, J. (2005). Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque, 26*(1), 93-99. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000100009

Neto, R. M. (2022). Performance silvicultural de eucalipto em dois modelos de plantio em sistema silvipastoril. *Scientia Naturalis*, *4*(2), 427-435. https://doi.org/10.29327/269504.4.2-1

Nicodemo, M. L. F., Muller, M. D., Porfírio-da-Silva, V., Carpanezzi, A. A., Pezzopane, J. R. M., & Barioni Júnior, W. (2016). Growth of native trees in two agroforestry systems. *Revista Árvore, 40*(4), 639-647. https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400007

Pacheco, J. M. (2013). *Influência do espaçamento no crescimento de Pinus taeda L. na região Centro-Sul do Paraná* [Tesis de maestría]. Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Pastorini, V., & Acosta, P. (2011). Aportes del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca para la integración de la forestación en predios ganaderos. En *Anuario OPYPA 2011*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/aportes_del_mgap_para_la_integracion_de_la_forestacion_en_predios_ganaderos_2.pdf

Pelufo Laxalde, M., & Vázquez Albertini, A. R. (2007). *Ensayo de podas y raleos de Eucalyptus grandis en Rivera: Etapa 1. Evaluación del crecimiento e incremento a la edad 6 años* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. https://hdl.handle.net/20.500.12008/37398

Peri, P. L., Dube, F., & Varella, A. C. (2016). Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: An overview. En *Silvopastoral systems in Southern South America* (pp. 1-8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_1

Perrotti, E. G. (2017). *Sistema silvopastoril con clones de Eucalyptus grandis* [Trabajo final de especialización, Universidad Nacional del Nodeste]. RIUNNE. http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/1649

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., du Toit, B., Farnden, C., & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening, 14*(3), 466-479. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006

Promis, A., Caldentey, J., & Ibarra, M. (2010). Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque*, *31*(2), 129-139. https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200006

QGIS development team. (2024). *QGIS Geographic Information System* (Versión 3.34) [*Software*]. https://www.qgis.org/

Ribaski, J., Dedecek, R. A., Mattei, V. L., Flores, C. A., Vargas, A. F. C., & Ribaski, S. A. G. (2005). *Sistemas silvipastoris: Estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul*. Embrapa. http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/312314

Sanchis Cooper, R. (2025). *Efecto de la densidad arbórea sobre parámetros dasométricos de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden en sistemas silvopastoriles* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. https://hdl.handle.net/20.500.12008/54214

Sancho, L., Arocena, I., & Ordeig, L. (2021). *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*. MA; MGAP; GEF; PNUD.

Schinato, F. (2022). *Evaluación de servicios ambientales en un sistema silvopastoril* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. https://hdl.handle.net/20.500.12008/35851

Sotomayor Garretón, A., & Teuber Winkler, O. R. (2011). Evaluación del efecto de los árboles manejados bajo orientación silvopastoril en los parámetros climáticos del sitio, en relación a un manejo ganadero sin árboles. *Ciencia & Investigación Forestal, 17*(1), 23-40. https://doi.org/10.52904/0718-4646.2011.357

Sotomayor Garretón, A., Teuber Winkler, O. R., & Moya Navarro, I. (2009). Resultados y experiencias sobre manejo de sistemas silvopastoriles en la región de Aysén. En O. R. Teuber Winkler (Ed.), *Sistemas agroforestales para la región de Aysén: Cortinas cortaviento y silvopastoreo* (pp. 165-199). INIA; INFOR.

Tamosiunas, M. (2015). La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: La visión del productor. *Agrociencia (Uruguay)*, *19*(1), 150-157. https://doi.org/10.31285/AGRO.19.367

Viñoles, C., Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., & Posse, J. P. (2017). Estado actual de la investigación en sistemas silvopastoriles en Uruguay. En *Sistemas silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad* (pp. 3-23). Polo Agroforestal.

World Meteorological Organization. (2023). *WMO climatological standard normals for 1991–2020 (NCEI Accession 0253808)* [Conjunto de datos]. NOAA National Centers for Environmental Information. https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/0253808

8 ANEXOS

Anexo A

Parámetros ajustados de los modelos

Tabla A1

Modelo de DAP

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	7,2126	0,4625
Bloque 2	1,1088	0,4006
Bloque 3	2,1116	0,4006
Tratamiento 4F	0,3228	0,5665
Edad 3,6 años	4,3867	0,5665
Edad 5 años	10,5418	0,5665
Tratamiento 4F x edad 3,6 años	0,5219	0,8011
Tratamiento 4F x edad 5 años	0,5115	0,8011

Tabla A2

Modelo de altura total

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	5,5479	0,5456
Bloque 2	1,6562	0,4725
Bloque 3	1,9464	0,4725
Tratamiento 4F	0,4511	0,6682
Edad 3,6 años	3,4851	0,6682
Edad 5 años	6,0332	0,6682
Tratamiento 4F x edad 3,6 años	−0,2309	0,9450
Tratamiento 4F x edad 5 años	0,2305	0,9450

Tabla A3

Modelo de área transversal individual (g)

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	0,024916	0,001449
Bloque 2	0,004127	0,001774
Bloque 3	0,008327	0,001774
Tratamiento 4F	0,002732	0,001449

Tabla A4

Modelo de área basal por hectárea (AB)

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	3,8893	0,2260
Bloque 2	0,7167	0,2768
Bloque 3	1,5676	0,2768
Tratamiento 4F	2,6312	0,2260

Tabla A5

Modelo de volumen aparente individual

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	0,27411	0,01387
Bloque 2	0,15612	0,01699
Bloque 3	0,21383	0,01699
Tratamiento 4F	0,05650	0,01387

Tabla A6

Modelo de volumen aparente por hectárea

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	40,073	2,321
Bloque 2	29,581	2,843
Bloque 3	40,967	2,843
Tratamiento 4F	40,361	2,321

Tabla A7

Modelo de diámetro de copa

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	3,8747	0,1501
Tratamiento 4F	−0,2341	0,1431
Bloque 2	0,9084	0,1651
Bloque 3	0,9589	0,1681

Tabla A8

Modelo porcentaje de copa

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	0,597697	0,010859
Tratamiento 4F	−0,006482	0,010320
Bloque 2	−0,012006	0,011944
Bloque 3	−0,028625	0,012062

Tabla A9

Modelo de largo de copa viva

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	6,5978	0,2928
Tratamiento 4F	0,2629	0,2783
Bloque 2	1,9530	0,3221
Bloque 3	1,6155	0,3253

Tabla A10

Modelo de área de copa

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	12,513	1,064
Tratamiento 4F	−1,277	1,014
Bloque 2	5,965	1,170
Bloque 3	6,760	1,191

Tabla A11

Modelo volumen de copa

Parámetro	Estimación	Error estándar
Intercepto	39,406	5,778
Tratamiento 4F	2,432	5,491
Bloque 2	40,485	6,355
Bloque 3	39,455	6,418

Tabla A12

Modelo de temperatura media

Estación	Período	Parámetro	Estimación	Error estándar
Primavera	Día	Intercepto	20,8043	0,9793
Primavera	Día	2F_Efila	-0,4743	0,3485
Primavera	Día	4F_Callejón	-0,5169	0,3999
Primavera	Día	4F_Efila	-0,3095	0,3485
Primavera	Día	Control	-0,6324	0,3842
Primavera	Noche	Intercepto	17,1200	0,8951
Primavera	Noche	2F_Efila	-0,1269	0,9169
Primavera	Noche	4F_Callejón	0,1603	1,0451
Primavera	Noche	4F_Efila	0,1083	0,9168
Primavera	Noche	Control	-1,0631	0,9351
Verano	Día	Intercepto	24,5239	0,9829
Verano	Día	2F_Efila	-0,0744	0,3203
Verano	Día	4F_Callejón	-0,5050	0,3201
Verano	Día	4F_Efila	-0,2262	0,3200
Verano	Día	Control	-0,4484	0,3657
Verano	Noche	Intercepto	21,4530	0,8122
Verano	Noche	2F_Efila	-0,1823	0,3017
Verano	Noche	4F_Callejón	0,2369	0,3018
Verano	Noche	4F_Efila	-0,0475	0,3017
Verano	Noche	Control	0,2485	0,3443
Otoño	Día	Intercepto	16,7128	0,7696
Otoño	Día	2F_Efila	-0,3642	0,4230
Otoño	Día	4F_Callejón	-0,1806	0,4325
Otoño	Día	4F_Efila	-0,3520	0,4230
Otoño	Día	Control	-0,4111	0,4832
Otoño	Noche	Intercepto	15,1379	0,6189
Otoño	Noche	2F_Efila	-0,5574	0,4958
Otoño	Noche	4F_Callejón	0,0012	0,5051
Otoño	Noche	4F_Efila	-0,3616	0,4958
Otoño	Noche	Control	-0,5130	0,5645
Invierno	Día	Intercepto	13,1086	0,6886
Invierno	Día	2F_Efila	-0,5671	0,6960
Invierno	Día	4F_Callejón	-1,5748	0,6989
Invierno	Día	4F_Efila	-0,4904	0,6960
Invierno	Día	Control	-0,5070	0,7934
Invierno	Noche	Intercepto	10,8430	0,6383
Invierno	Noche	2F_Efila	0,0703	0,5297
Invierno	Noche	4F_Callejón	0,6993	0,5336
Invierno	Noche	4F_Efila	0,1506	0,5297
Invierno	Noche	Control	0,0922	0,6053

Tabla A13
Modelo de humedad relativa media

Estación	Período	Parámetro	Estimación	Error estándar
Primavera	Día	Intercepto	68,5288	2,3770
Primavera	Día	2F_Efila	1,4765	0,9789
Primavera	Día	4F_Callejón	2,5848	1,1231
Primavera	Día	4F_Efila	-0,0033	0,9789
Primavera	Día	Control	3,0513	1,0791
Primavera	Noche	Intercepto	76,3457	2,9456
Primavera	Noche	2F_Efila	2,4937	3,1045
Primavera	Noche	4F_Callejón	2,0855	3,5367
Primavera	Noche	4F_Efila	0,8992	3,1044
Primavera	Noche	Control	4,7140	3,1393
Verano	Día	Intercepto	71,4747	3,2562
Verano	Día	2F_Efila	0,2252	1,4154
Verano	Día	4F_Callejón	2,5458	1,4152
Verano	Día	4F_Efila	0,6311	1,4150
Verano	Día	Control	3,0357	1,6142
Verano	Noche	Intercepto	79,0232	2,5148
Verano	Noche	2F_Efila	0,4663	2,6931
Verano	Noche	4F_Callejón	0,5448	2,6932
Verano	Noche	4F_Efila	2,0066	2,6931
Verano	Noche	Control	0,8346	3,0448
Otoño	Día	Intercepto	79,3228	2,3407
Otoño	Día	2F_Efila	2,6432	1,3095
Otoño	Día	4F_Callejón	2,8555	1,3232
Otoño	Día	4F_Efila	2,5052	1,3095
Otoño	Día	Control	2,6391	1,4936
Otoño	Noche	Intercepto	82,8056	2,1612
Otoño	Noche	2F_Efila	3,3417	2,8466
Otoño	Noche	4F_Callejón	2,2527	2,8560
Otoño	Noche	4F_Efila	3,4102	2,8466
Otoño	Noche	Control	3,2016	3,1335
Invierno	Día	Intercepto	78,8335	1,7245
Invierno	Día	2F_Efila	3,5513	1,1060
Invierno	Día	4F_Callejón	5,0385	1,1147
Invierno	Día	4F_Efila	2,8456	1,1060
Invierno	Día	Control	2,9346	1,2653
Invierno	Noche	Intercepto	84,6270	2,3157
Invierno	Noche	2F_Efila	2,5604	3,2398
Invierno	Noche	4F_Callejón	-0,4765	3,2417
Invierno	Noche	4F_Efila	1,6942	3,2398
Invierno	Noche	Control	1,5000	3,6295