

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN SISTEMAS SILVOPASTORILES EN
EUCALYPTUS GRANDIS Y DUNNI**

por

Diego MARTÍNEZ VILA

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dr.) Jaime Gonzalez Talice

Codirector/a:

Ing. Agr. (Mag.) Gina Dogliotti

Tribunal:

Ing. Agr. (Dr.) Mercedes Arias

Ing. Agr. (Mag.) Carolina Munka

Ing. Agr. (Mag.) Gina Dogliotti

Fecha:

17 de diciembre de 2025

Estudiante:

Diego Martínez Vila

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República por brindarnos los conocimientos durante toda la carrera.

A mis directores de trabajo final de grado, Gina Dogliotti y Jaime González, por su dedicación y permanente disposición.

A la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt por permitirnos llevar a cabo nuestra investigación en sus instalaciones.

A Tesis Agronomía por la corrección del presente trabajo. A la biblioteca de la Facultad de Agronomía y la Universidad de la República por la ayuda en la búsqueda de la información.

Por último, y muy especialmente, a mi familia, y a todas aquellas personas que formaron parte de la carrera y brindaron su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivo general:	11
1.2 Objetivos específicos:	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Sistemas Agroforestales	12
2.2 Sistemas silvopastoriles	12
2.2.1 Sistemas silvopastoriles en Uruguay.....	12
2.3. Efecto de los árboles sobre el microclima.....	13
2.3.1 Radiación	14
2.3.2 Temperatura	15
2.3.3 Humedad del suelo	16
2.3.4 Humedad del suelo en Sistemas Silvopastoriles	16
2.4. Índice de Área Foliar (IAF).....	17
2.4.1 Métodos de estimación de IAF	17
2.4.2 Métodos indirectos	18
2.4.3 LAI-2200	18
2.4.4 Fotografía hemisférica digital	18
2.4.5 Métodos directos	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Lugar de estudio	21
3.2 IAF	23
3.3 Ceptómetro	24
3.4 Variables dendrométricas.....	24
3.5 Defoliación.....	25

3.6 WinDIAS.....	25
3.7 Análisis estadístico	25
4. RESULTADOS	27
4.1 Distribución de la luz en canopias de <i>E. dunnii</i> y <i>E. grandis</i> en sistema silvopastoril	27
4.2 Índice de área foliar estimado mediante Licor y WinDIAS.....	28
4.3 Promedio de Área Foliar Total (AFT) (m ²).....	29
4.4 Índice de área foliar por estrato	30
4.5 Índice de área foliar	32
4.6 Transmitancia (I/I ₀) en función de la profundidad de la copa por arreglo.	33
4.8 Variables foliares	35
4.8.1 Tamaño de hoja promedio por estrato.	35
4.8.2 Tamaño de hoja (cm ²).....	36
4.8.3 Área de hoja (cm ²) en función de largo (cm).....	37
4.8.4 Promedios de área, perímetro, longitud y ancho foliar en <i>E. dunnii</i> y <i>E. grandis</i>	38
4.8.5 Numero de hojas	39
5. DISCUSIÓN.....	40
6. CONCLUSIONES	45
7. BIBLIOGRAFIA	46

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Página
Tabla 1 <i>Resultado de mediciones de variables dendrométricas</i>	24
Figura	Página
Figura 1 <i>Disposición de bloque: especies y espaciamientos</i>	22
Figura 2 <i>Diseño experimental del ensayo</i>	22
Figura 3 <i>Esquema representativo de los estratos (H0-H1; H1-H2; H2-H3; H3-Copa) ...</i>	23
Figura 4 <i>Delimitación de estratos y transmitancia promedio por tratamiento (línea negra).</i>	27
Figura 5 <i>Relación entre IAF del LAI-2200 y área foliar medida con WinDIAS</i>	28
Figura 6 <i>Área foliar total por metro de tallo para especies y arreglos</i>	29
Figura 7 <i>IAF por metro de tallo, como superficie foliar por unidad de superficie de suelo (m²/m²)</i>	30
Figura 8 <i>IAF acumulado estimado mediante WinDIAS</i>	32
Figura 9 <i>Transmitancia (%PAR) que atraviesa el dosel en función del arreglo espacial..</i>	33
Figura 10 <i>Transmitancia (%PAR) en función de la especie..</i>	34
Figura 11 <i>Tamaño de hoja promedio (cm²) en función de los estratos definidos.</i>	35
Figura 12 <i>Tamaño de hoja (cm²) para E. grandis y E. dunnii</i>	36
Figura 13 <i>Relación lineal entre área de hoja y largo de hoja para</i>	37
Figura 14 <i>Comparación de variables foliares entre especies (media ± desviación estándar, p < 0,05).</i>	38
Figura 15 <i>Número de hojas por especie, estrato y disposición en la fila</i>	39

RESUMEN

Este estudio evaluó la distribución vertical del índice de área foliar (IAF) y la transmitancia de luz en un sistema silvopastoril con *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*, comparando arreglos de simple y triple fila. Se trabajó con diez árboles representativos, en los que la copa se subdividió en cuatro estratos. En cada estrato se midió transmitancia mediante ceptometría y se estimó el IAF mediante el analizador LAI-2200. Posteriormente, se realizó una determinación destructiva del área foliar mediante escaneo digital de hojas para comparar con las mediciones indirectas. Los individuos presentes en el estudio contaban con una año y medio de plantación. La transmitancia fue explicada por una función exponencial negativa y determinada tanto por especie como por arreglo. En cuanto al índice de área foliar (IAF), la fila simple presentó valores bajos (0,3–0,4), mientras que la triple fila alcanzó valores marcadamente superiores (1,2–2,1). El método indirecto (LAI-2200) mostró diferencias de estimación respecto al método destructivo, con tendencias a la subestimación en el IAF. La transmitancia por su parte en fila simple, se observaron diferencias consistentes entre especies. En el estrato H0–H1, *E. grandis* presentó un valor de transmitancia 57% menor que *E. dunnii*. En los estratos H1–H2, H2–H3 y H3–Copa, las diferencias fueron de 22%, 50% y 11%, respectivamente, siempre con valores menores para *E. grandis*. En cuanto al arreglo de triple fila, en la fila central se observaron diferencias entre especies de sentido opuesto al arreglo simple. En esta disposición, *E. grandis* presentó valores de transmitancia 58% mayores que *E. dunnii* en el estrato HO-H1. La caracterización conjunta de transmitancia e IAF aporta información relevante para el diseño y manejo de sistemas silvopastoriles con *Eucalyptus* spp., proporcionando herramientas para optimizar el uso de los recursos y viabilidad de dichos sistemas entendiendo la influencia que pueden tener las variables analizadas sobre el crecimiento tanto del árbol como de la pastura.

Palabras clave: distribución vertical de la luz, arquitectura de copa, transmitancia

ABSTRACT

This study evaluated the vertical distribution of leaf area index (LAI) and light transmittance in a silvopastoral system with *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*, comparing single-row and triple-row planting arrangements. Ten representative trees were selected, and each crown was subdivided into four strata. In each stratum, light transmittance was measured using a ceptometer, and LAI was estimated with the LAI-2200 canopy analyzer. A destructive determination of leaf area was later performed through digital leaf scanning to compare with the indirect measurements. *E. grandis* exhibited a mean height of 4.7 m, a diameter at breast height (DBH) of 4.6 cm, and a live crown height of 4.4 m, exceeding *E. dunnii* by 1 m, 0.66 cm, and 0.7 m, respectively. Light transmittance followed a negative exponential function and was influenced by both species and planting arrangement. LAI values were low in the single-row arrangement (0.3–0.4) and substantially higher in the triple-row arrangement (1.2–2.1). The indirect method (LAI-2200) consistently underestimated LAI compared with the destructive WinDIAS measurements. In the single-row arrangement, species differed markedly in transmittance: in the H0–H1 stratum, *E. grandis* showed 57% lower transmittance than *E. dunnii*, while differences in the H1–H2, H2–H3, and H3–Crown strata were 22%, 50%, and 11% respectively, always with lower values for *E. grandis*. In contrast, in the central row of the triple-row arrangement, the pattern reversed, and *E. grandis* exhibited 58% higher transmittance than *E. dunnii* in the H0–H1 stratum. The combined characterization of light transmittance and LAI provides relevant information for the design and management of silvopastoral systems with *Eucalyptus* spp., offering tools to optimize resource use and improve system viability by understanding how these variables influence both tree growth and understory forage production.

Keywords: vertical light distribution, crown architecture, transmittance

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son sistemas de producción que integran árboles, pasturas y ganado en un mismo espacio y tiempo. En Uruguay, la ganadería basada en pasturas naturales y mejoradas ha sido históricamente la actividad predominante. Sin embargo, en los últimos 35 años el sector forestal ha experimentado un crecimiento sostenido, hasta convertirse en uno de los principales rubros de exportación del país. Actualmente, más de un millón de hectáreas se encuentran forestadas, principalmente con especies del género *Eucalyptus*, las especies *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* son las especies más utilizadas dentro de las plantaciones forestales, representando aproximadamente el 31,6 % y 28 % respectivamente, sobre un total de 1.161.851 hectáreas efectivamente destinadas al uso forestal (Dirección General Forestal [DGF], 2025).

La interacción entre árboles y ganado no es nueva en Uruguay: tradicionalmente, los árboles han estado presentes en el paisaje productivo brindando sombra, abrigo, leña y otros servicios ecosistémicos. No obstante, la incorporación planificada de árboles como componente productivo dentro del sistema constituye un enfoque más reciente y con un potencial aún en expansión.

En este contexto, resulta fundamental estudiar cómo la presencia y el arreglo espacial de los árboles modifican la estructura del dosel y el ambiente lumínico del sistema, dado que estos factores influyen sobre la disponibilidad de forraje, el microclima, el comportamiento animal y la productividad general del sistema. Un conocimiento profundo de estas interacciones permite mejorar la toma de decisiones, optimizar el diseño de los SSP y potenciar los beneficios ambientales y productivos que pueden aportar.

La comprensión de cómo la estructura del dosel modula la transmisión de radiación y la acumulación de área foliar es fundamental para interpretar el desempeño ecofisiológico de SSP. En particular, los arreglos espaciales en simple y triple fila generan contrastes marcados en la densidad del dosel, la distribución vertical de hojas y el patrón de penetración de la luz hacia el sotobosque. Estas diferencias influyen directamente en la productividad forestal y forrajera, por lo que su evaluación requiere métodos capaces de caracterizar tanto la estructura como el funcionamiento del dosel.

Dado que la estructura vertical del dosel y la distribución de la luz determinan gran parte del comportamiento productivo de los SSP, se vuelve necesario cuantificar con precisión cómo estas variables cambian según la especie y el arreglo espacial de plantación. Bajo este enfoque, el presente trabajo se propuso los siguientes objetivos:

1.1 Objetivo general:

Cuantificar la distribución vertical del índice de área foliar (IAF) y de la transmitancia de luz en un sistema silvopastoril con *Eucalyptus grandis* y *E. dunnii*, comparando arreglos de simple y triple fila y evaluando la concordancia entre el método indirecto LAI-2200 y un método destructivo basado en escaneo de hojas.

1.2 Objetivos específicos:

1. Describir la distribución vertical del área foliar en árboles de *E. grandis* y *E. dunnii* establecidos en arreglos de simple y triple fila, como base para la interpretación de la transmitancia.
2. Cuantificar la transmitancia vertical de luz mediante el uso de ceptómetro, evaluando diferencias entre estratos, especies y arreglos espaciales.
3. Estimar el IAF por estrato mediante métodos indirectos y destructivos, combinando mediciones con el analizador de dosel LAI-2200 y la cuantificación del área foliar por escaneo digital de hojas, con el fin de evaluar la concordancia y las divergencias entre ambos procedimientos.
4. Analizar el efecto del arreglo espacial y la especie sobre la distribución vertical de luz y área foliar, integrando los resultados obtenidos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) se caracterizan por la integración de sistemas forestales con actividades de producción de alimentos, según lo describe King (1979). Estos sistemas combinan componentes leñosos perennes con otras formas de producción, como la agricultura o la ganadería, con el objetivo de maximizar los beneficios en comparación con los obtenidos mediante un único tipo de producción (Jose, 2009). Este enfoque permite optimizar el uso de la tierra (Alao & Shuaibu, 2013). Dentro de los SAF, los sistemas silvopastoriles (SSP) representan una modalidad específica que integra la ganadería y la forestación en un mismo espacio y tiempo, logrando una sinergia entre ambas actividades.

2.2 Sistemas silvopastoriles

Existen muchas interpretaciones de lo que es un sistema en referencia a sistemas agropecuarios, varios autores lo definen como un conjunto de elementos interrelacionados y coordinados para el logro de un objetivo determinado (Churchman, 1968; Kolmans & Vásquez, 1996). Los SSP integran la producción ganadera y forestal con un diseño específico e intencional con el fin de lograr un mayor beneficio o eficiencia en el uso de la tierra (Murgueitio et al., 2014; Paciullo et al., 2021). Los SSP fueron definidos en Sancho et al. (2021) como “una integración deliberada y a largo plazo de árboles, ganado y pasturas, que interactúan en forma armónica, propendiendo a la sinergia de sus componentes, con el objetivo de maximizar la producción del sistema en forma sostenible” (p. 30).

2.2.1 Sistemas silvopastoriles en Uruguay

Según Sancho et al. (2021), había 39 establecimientos que desarrollaban sistemas silvopastoriles, ocupando una superficie efectiva de 6.400 ha aprox. El 80% de los mismos se encuentran en la región sureste del país, mientras que el restante se reparte en el centro-sur (15%) y norte (5%).

Si bien la integración de la ganadería con la forestación existe hace muchos años en el Uruguay no ha resuelto los problemas productivos que enfrenta la ganadería, tales como resiliencia del sistema, baja productividad física y económica, degradación de los recursos naturales (Modernel et al., 2016). Los sistemas silvopastoriles han aumentado en nuestro país

desde la introducción de sistemas forestales extensivos hace tres décadas (Sancho et al., 2021)

Pero tanto los investigadores como productores forestales tienen sistemas en los cuales predomina claramente un tipo de producción sobre el otro (Bussoni et al., 2019). Por su parte Tamosiunas (2015) afirma que para incrementar su adopción es fundamental desarrollar planes de gestión integral junto con los productores, para que identifiquen los árboles como un rubro con potencial de generar ingresos para la unidad de producción. En Uruguay es común, y practicado en la mayoría de los campos forestados (Cubbage et al., 2012).

2.3. Efecto de los árboles sobre el microclima

Los árboles reducen la temperatura ambiente al proporcionar sombra y disminuir la radiación solar directa. Se han registrado reducciones de 3,8° C en verano en árboles con una altura promedio de 6-8 metros y de 2,1°C en árboles menores a 6 metros en verano en árboles con una altura promedio de 6-8 metros y de 2,1°C en árboles menores a 6 metros (Bahamonde et al., 2009). Los autores afirman que la variación en la temperatura media del suelo puede variar debido al arreglo, densidad y altura de los árboles. En Uruguay, se ha reportado que en los meses de mayor temperatura (diciembre-febrero), el monte de *Pinus taeda* de 8 años de edad reduce la temperatura del aire en 2,6-2,8°C entre las 10 y 20 hs, mientras que en el invierno, las temperaturas nocturnas son más elevadas (+1°C) (Fedrigo et al., 2017). Por su parte, la Comisión Nacional de Fomento Rural y la Universidad de la República (2016) indican que la magnitud de los cambios en temperatura depende de la densidad del monte, siendo mayores en montes más densos (3,5°C, 1189 plantas ha⁻¹) comparado con montes de menor densidad (1,5°C, 642 plantas ha⁻¹).

La presencia de árboles aumenta la humedad relativa del aire mediante la transpiración, refrescando el entorno. La humedad relativa del aire es mayor en áreas con cobertura de bosque, aunque la magnitud del cambio depende de su altura (hasta 6 metros: 3 % y 6-8 metros, 20%) (Bahamonde et al., 2009). El aumento en la humedad del aire por evaporación de las hojas es parte del mecanismo por el cual los árboles producen una reducción en la temperatura (Grantz, 1990).

Los árboles actúan como barreras contra el viento, reduciendo su velocidad y creando un microclima más estable y protegido. El microclima bajo el dosel es menos ventoso, pudiendo

llegar a ser un 25% o 20% inferior respecto de la observada en el exterior (Gandullo, 1994; Lee, 1978; Parde, 1978).

2.3.1 Radiación

La radiación es uno de los principales factores climáticos que impulsa la producción en todos los sistemas. En los SSP, la copa de los árboles reduce y modifica la luz disponible en el sotobosque. La composición espectral de la radiación solar en el sotobosque es dinámica y está influenciada por factores como el ángulo cenital solar, la perturbación del viento y los efectos del dosel forestal (Deng et al., 2023).

Los efectos combinados de la apertura del dosel y el índice de área foliar (IAF) del rodal afectan la intensidad de la radiación y la composición espectral de la luz del sotobosque (Su et al., 2024). Estas variaciones regulan diversos procesos ecofisiológicos de las plantas en el sotobosque influenciando su crecimiento.

La densidad de árboles en el sistema afecta el microclima local (Deniz et al., 2021; Pezzopane et al., 2019) y la producción de la pastura (Pezzopane et al., 2020; Vieira et al., 2021); a mayor densidad de árboles, mayor área de sombra y menor nivel de radiación en el pasto (Vieira Junior et al., 2022). La producción forrajera se ve disminuida en cantidad, este hecho ha sido comprobado por varios estudios, que informaron que cuanto mayor es el nivel de sombra, menor es la producción de forraje (Pezzopane et al., 2020; Rozados-Lorenzo et al., 2007).

A su vez, hay evidencia de que la baja producción de forraje se compensa con la mejor calidad nutricional del pasto, por lo que el rendimiento de los animales no se ve afectado (Devkota et al., 2009; Paciullo et al., 2017, 2021). La mejora en la calidad de las plantas se debe, en parte, a un menor efecto de dilución del nitrógeno en la biomasa, gracias a una biomasa reducida (Gastal & Lemaire, 2002). Además, el aumento del contenido de proteína cruda se explica por la transferencia de nitrógeno desde las raíces y los tallos hacia las láminas de las hojas, lo que potencia la concentración de cloroplastos y, a su vez, mejora la eficiencia fotosintética (Cruz, 1997).

2.3.2 Temperatura

La temperatura es un factor determinante en la eficiencia y producción animal, temperaturas por encima o por debajo de cierto umbral afectan negativamente dichos parámetros. Una de las formas más efectivas de reducir la producción de calor metabólico es a través de la reducción en la ingesta, lo que tiene consecuencias directas e indirectas en la producción y la reproducción (Wheelock et al., 2010).

El estrés calórico prolongado disminuye las concentraciones de la hormona de crecimiento, lo que reduce la tasa de crecimiento y consecuentemente la calidad de la carne (Savsani et al., 2015). Con el fin de estudiar el estrés calórico se puede utilizar el globo negro, un instrumento que combina los efectos de la radiación con la temperatura del aire y la velocidad del viento (Bond & Kelly, 1955), dando como resultado una medición que tiene en cuenta la radiación (Rovira & Velazco, 2012). En un trabajo publicado por Munka et al. (2017) los valores térmicos de los globos negros expuestos al sol fueron superiores en un rango de 6 a 9°C respecto a los que permanecieron bajo los montes, siendo la magnitud de la diferencia dependiente de la densidad de estos.

Por otro lado, las bajas temperaturas también afectan a la producción animal. El estrés por frío es un factor importante en el lento crecimiento y el aumento de la mortalidad de los animales (Wang et al., 2023). Por su parte, Webster et al. (2008) afirman que los principales cambios adaptativos que ocurren en el estrés por frío incluyen 1) aislamiento térmico manifestado por la actividad y el pelaje, 2) un aumento en la tasa metabólica en reposo y 3) un aumento en la tasa de paso. El estrés por frío se asocia con cambios de comportamiento, que incluyen acurrucarse, reducir la condición corporal, disminuir el consumo de alimento y agua y limitar la movilidad (Jemal & Lemma, 2015; Orihuela, 2000).

Las cubiertas vegetales reducen la amplitud térmica en el aire y el suelo (Munka, 2017) y reducen la incidencia de cáncer de piel y desórdenes de fotosensibilidad (Djimde et al., 1989). Los SSP se están convirtiendo en una estrategia importante para reducir los impactos de la variabilidad y el cambio climático en la producción animal (Fedrigo et al., 2018; Pezzopane et al., 2020).

2.3.3 Humedad del suelo

La presencia de una cubierta vegetal favorece la infiltración y dosifica la llegada de agua al suelo teniendo incidencia en el ciclo del agua (Adams, 1966; Ríos et al., 2007; Young, 1997). Según Munka Moreno (2010) los efectos hidrológicos de las copas de los árboles están relacionados con el aumento de la intercepción del agua de lluvia y de la evaporación desde la canopia, reduciendo el escurrimiento superficial, la infiltración, y modificando la dinámica del agua en el suelo. Las plantaciones de *Eucalyptus* dada su naturaleza simpodial, estructura más abierta y corteza lisa, facilitan la captación y conducción del agua por su corteza y tronco hasta llegar al suelo inmediatamente después del inicio de las precipitaciones (Besteiro & Rodríguez Vagaría, 2012).

El aporte del escurrimiento a través del fuste puede ser relevante en épocas de precipitaciones poco frecuentes (Besteiro & Rodríguez Vagaría, 2012; Young, 1997). Parte de esto es afirmado también por Adams (1966) indicando una mayor infiltración debido en parte al efecto esponja del mulch en el suelo, el cual permite la retención de agua. Los SSP brindan beneficios hidrológicos al contribuir en la infiltración y disminuir la escorrentía superficial, contribuyendo a la recarga y sustento de acuíferos (Ríos et al., 2007).

El contenido de humedad en el suelo puede variar en función de las características de la cubierta forestal, como edad, densidad y arreglo. En arboles de 4 y 5 años a una densidad de 1000 pl/ha Sotelo et al. (2021) reportaron valores de humedad del suelo superiores a pleno sol que bajo la cubierta forestal. Estos resultados coinciden con los de Munka (2017), quien indica que la precipitación es interceptada por la cubierta forestal, pudiendo ser evaporada o precipitada desde el dosel al suelo, determinando que el contenido de humedad del suelo debajo del dosel sea menor respecto a áreas sin presencia arbórea.

Munka Moreno (2010) señala el efecto del manejo silvicultural en la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración, la cual varía cuando se interviene, reemplaza o quita la cobertura foliar. El régimen de podas y raleos en estos sistemas provocaría cambios en la cobertura foliar modificando así las condiciones de evapotranspiración y humedad del suelo.

2.3.4 Humedad del suelo en Sistemas Silvopastoriles

La remoción del agua del suelo en periodos secos cercano a la fila de árboles es mayor, debido a una mayor capacidad de exploración y actividad radicular (Gyenge et al., 2002;

Pezzopane et al., 2015; Pollock et al., 2009). Pezzopane et al. (2020) reportan que el contenido de humedad del suelo vario entre un SSP y un sistema de pasto a pleno sol, pudiendo ser mayor o menor dentro del SSP en relación con la condición de pleno sol. Por lo que para analizar dicho tema en cuestión se debe tener una mirada más amplia en lo que refiere al contexto en el que se analice la situación, tanto climático como características propias del rodal. Por su parte Dogliotti Perrone (2024) también encontró diferencias en lo que refiere al gradiente de contenido de humedad. En plantaciones de 3 a 4 años la humedad en la entre fila fue menor que en el callejón, pero a su vez la humedad en la entre fila respecto al callejón fue mayor en plantaciones de 12 a 13 años.

2.4. Índice de Área Foliar (IAF)

El Índice de Área Foliar (IAF) se define como la superficie foliar por unidad de superficie de suelo (Watson, 1947), dicho parámetro se presenta como un descriptor de la estructura del dosel y figura como una de las principales variables utilizadas en modelos referidos a procesos fotosintéticos y evapotranspirativos de cubiertas forestales. El área foliar es la superficie en la que se intercambia energía y materia entre una planta y la atmósfera; se considera una variable clave para modelar el crecimiento de los árboles y de las condiciones de un bosque (Guangjian et al., 2019).

Poder estimar el IAF es de gran importancia ya que está altamente relacionado con la producción del bosque. La producción por su parte depende de la interceptación de la luz para la fotosíntesis, y la interceptación de la luz depende del área de las hojas y de cómo están dispuestas dentro de las copas de los árboles individuales y dentro de las copas generales de los rodales (Binkley et al., 2013; Waring, 1983). El IAF nos proporciona información acerca de la cantidad de superficie fotosintética presente con relación a la superficie total del ecosistema o área de estudio y se relaciona con procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración, y la productividad (Nafarrete-Hecht et al., 2018).

2.4.1 Métodos de estimación de IAF

Hay diversos métodos para la estimación y los mismos pueden ser divididos en dos grupos, el IAF se puede estimar utilizando métodos ópticos indirectos o de muestreo directo (Garrigues et al., 2008; Jonckheere et al., 2004; Weiss et al., 2004).

2.4.2 Métodos indirectos

Los métodos ópticos indirectos basados en la ley de Beer-Lambert se adoptan ampliamente en numerosos campos dada su alta eficiencia y viabilidad para la estimación del IAF. Estos métodos han experimentado un progreso considerable en las últimas décadas, lo que los hace operativos en la medición del IAF en tierra e incluso en la estimación aérea.

Los métodos indirectos son sensibles a la presencia de elementos vegetales distintos de las hojas verdes (por ejemplo, ramas, troncos y hojas senescentes) y están sujetos a distintas suposiciones teóricas. El analizador de dosel vegetal LAI-2000 o LAI-2200 (PCA; LI-COR Inc., Lincoln, NE, EE. UU.) y la fotografía hemisférica digital (DHP) se encuentran entre los métodos más utilizados para estimar la fracción de brecha del dosel y recuperar atributos del dosel como el IAF (Chianucci, 2015; Nilson et al., 2011). El LAI-2000 y AccuPAR son instrumentos de medida instantánea de IAF estimadas mediante la relación de lecturas a cielo abierto y bajo canopias que no requieren adquisición y procesamiento posterior del dato (Munka Moreno, 2010).

2.4.3 LAI-2200

El LAI-2200 tiene cinco anillos cónicos concéntricos (7° , 23° , 38° , 53° y 68°) que registran la luz incidente. La fracción de espacio se calcula a partir de lecturas simultáneas debajo y encima del dosel. Para sus mediciones se basa en sensores de luz de tipo “ojo de pez” (en cinco bandas angulares). La principal desventaja radica en que caracteriza la canopia forestal con solo cinco anillos concéntricos, que realiza un procedimiento inmediato de integración de las lecturas y por esto resulta imposible, a posteriori, cualquier análisis espacial de la distribución del follaje. Según Guangjian et al. (2019) y Ryu et al. (2010) el LAI 2000 proporciona una fracción de la brecha total en lugar de una distribución detallada de espacios en cada ángulo por lo que no se puede corregir el efecto aglutinante, aunque el mismo puede calcularse para tener en cuenta la agrupación en escalas espaciales mayores que las del campo de visión del sensor.

2.4.4 Fotografía hemisférica digital

La fotografía hemisférica digital (FHD) es propuesta como una medida adecuada del IAF para estudios tanto de la arquitectura de la canopia como de la transmisión de la radiación solar en cubiertas forestales (Zhang et al., 2005). La misma consiste en el uso de lente

hemisférico de tipo “ojo de pez” mediante el cual se estiman medidas de IAF debajo del dosel en condiciones de luminosidad difusa. Este método permite cuantificar la penetración de radiación solar en el dosel y además obtener una descripción de la arquitectura de la canopia traduciendo sobre un plano la imagen del campo hemisférico observada desde un punto en el terreno (Cabrelli et al., 2006; De Sousa & Ponzoni, 1998; Weiss et al., 2004). Los datos tomados mediante FDH requieren de procesamiento posterior en programas computacionales de análisis de la imagen fotográfica y genera un registro permanente del dato.

El análisis de la imagen fotográfica hemisférica proporciona múltiples variables radiativas y que han sido exitosamente utilizadas en diversos estudios de estructura de la canopia y penetración y eficiencia del uso de la luz (Jonckheere et al., 2004).

La técnica que utiliza modelos de inversión de transferencia radiativa estima la fracción gap (fracción de cielo visible) para medir la transmitancia de radiación solar hacia el suelo, asumiendo que la vegetación actúa como un cuerpo negro. Esta fracción se relaciona de forma no lineal con el Índice de Área Foliar (IAF), y una mayor frecuencia de contacto en el dosel implica una mayor proyección de hojas, lo que reduce exponencialmente la fracción gap (Weiss et al., 2004; Wythers et al., 2003; Zhang et al., 2005). Se observa que las metodologías basadas en la fracción gap tienden a subestimar el IAF en áreas foliares agrupadas (Santiago et al., 2000). Para cubiertas forestales, se recomienda la fotografía hemisférica, que puede reducir la subestimación del IAF entre un 15% y un 50% comparado con mediciones directas (Jonckheere et al., 2004).

Estudios comparativos de diferentes metodologías de estimación de IAF concluyen que las asociaciones más consistentes se han establecido entre el método LAI-2000 y las fotografías hemisféricas (Jonckheere et al., 2004; Zhang et al., 2005). Según Munka Moreno (2010), la técnica de LAI-2000 es también un método indirecto de instrumental óptico, pero en este caso integra varias mediciones direccionales de fracción gap de una única longitud de onda de 490 nm. En cubiertas forestales con doseles parcial y completamente cerrados (IAF de 0,29 y 4,63 respectivamente) la correlación entre ambas técnicas aumenta cuando los registros fotográficos digitales se realizan con adecuados contrastes de imagen y definición de la exposición (no automática) (Munka Moreno, 2010). Las fotografías (FHD) tomadas con exposición automática subestiman el IAF en un 48,7 % en promedio, mientras que

fotografías con mayor contraste de imagen subestiman en promedio un 23,1% (Zhang et al., 2005).

2.4.5 Métodos directos

Por otro lado, un método directo y destructivo es el manual (defoliando el ejemplar), también se emplea para bosques o muestras grandes de vegetación baja seleccionando pequeñas cantidades de hojas representativas y estableciendo relaciones alométricas. Las relaciones alométricas son funciones empíricas que relacionan el área foliar o el peso foliar (método gravimétrico) con cualquier dimensión del elemento leñoso que porta las hojas, incluyendo el área de albura, el diámetro del tallo y la altura de la base de la copa (Colaizzi et al., 2017; Jonckheere et al., 2004). Estas relaciones, que dependen del sitio, la especie e incluso el año (Bréda, 2003), se utilizan luego para ampliar la escala (Daughtry, 1990). Debido a su carácter intensivo en tiempo y mano de obra, entre otras limitaciones operativas, se puede decir que la determinación directa del IAF no es compatible con el seguimiento a largo plazo de la dinámica espacial y temporal del desarrollo del área foliar.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt (EEBR), perteneciente a la Facultad de Agronomía, ubicada en la localidad de Bañado Medina, departamento de Cerro Largo, Uruguay (coordenadas geográficas: 32°23'22"S 54°26'48"W). La estación se encuentra en el kilómetro 408 de la Ruta Nacional N.º 26, a 25 kilómetros de la ciudad de Melo, capital departamental. Según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (Durán & García Préchac, 2007), el área del estudio se encuentra dentro de la unidad Arroyo Blanco, el relieve de este grupo está constituido por colinas sedimentarias no rocosas y lomas suaves a lomadas fuertes (DGF, 2022). De acuerdo con el *Compendio de Suelos del Uruguay* (s.f.), los suelos dominantes en la zona son Brunosoles Subeútricos tipo profundo y superficial, pesados, de buen drenaje y con una fertilidad media., dentro del grupo de suelos CONEAT 6.3 en este grupo los suelos predominantes son de tipo Brunosoles Subeútricos, profundos y moderadamente profundos, de textura media a pesada con buen drenaje y fertilidad media.

El experimento se encuentra dentro del proyecto “Plasticidad de la arquitectura de árbol de diferentes genotipos de *Eucalyptus* en respuesta a distintos arreglos de plantación y el efecto sobre las interacciones pastura-leñosa a nivel aéreo y radicular en sistemas silvopastoriles”, el objetivo de este es estudiar la plasticidad del dosel arbóreo de distintos genotipos de estas especies en arreglos de plantación multi-hilera e hilera simple con dos anchos de callejón, como afecta esta respuesta a la pastura, la eficiencia de uso de la luz y la distribución de la densidad radicular del sistema. El diseño experimental del proyecto es de parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones, donde la parcela principal será el arreglo de plantación y la subparcela el genotipo

Para el presente trabajo final de grado, el estudio se centrará en un ancho de callejón de 14 metros, para plantaciones provenientes de semilla tanto para *E. grandis* como para *E. dunnii* en la disposición de fila simple en los tres bloques y en dos bloques para la fila central de una fila triple con un callejón también de 14 metros. El marco de plantación fue de 1,75*3 + 14 metros de callejón para fila simple y de 1,75*3 + 14 metros de callejón para fila triple, obteniendo así una densidad de 200 y 500 árboles/hectárea respectivamente. Las plantaciones

fueron establecidas en primavera de 2022, y las mediciones se realizaron en febrero de 2023, cuando los árboles contaban con aproximadamente un año y medio de edad.

Figura 1

Disposición de bloque: especies y espaciamientos

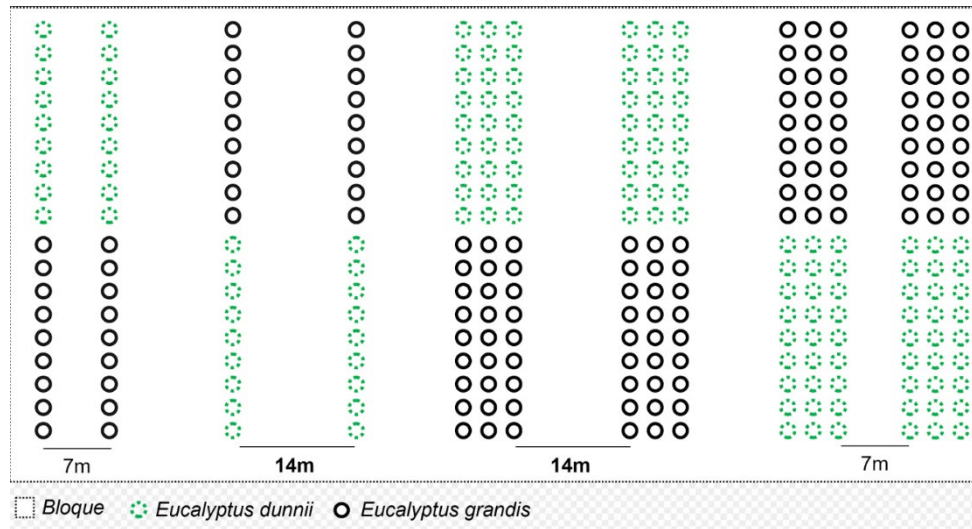
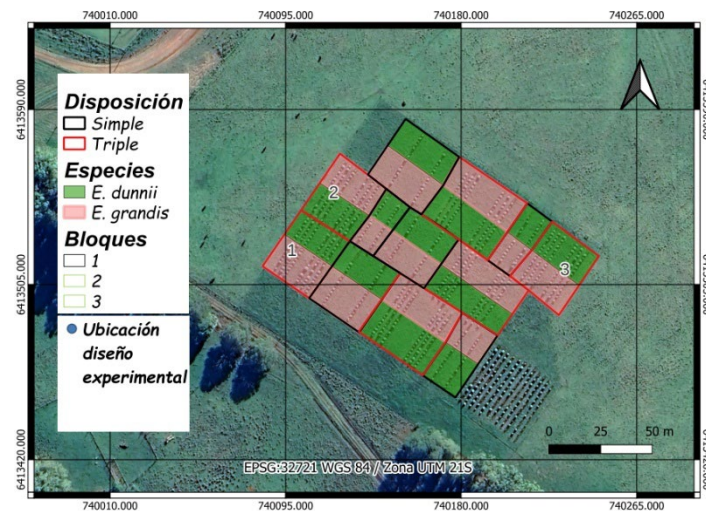


Figura 2

Diseño experimental del ensayo



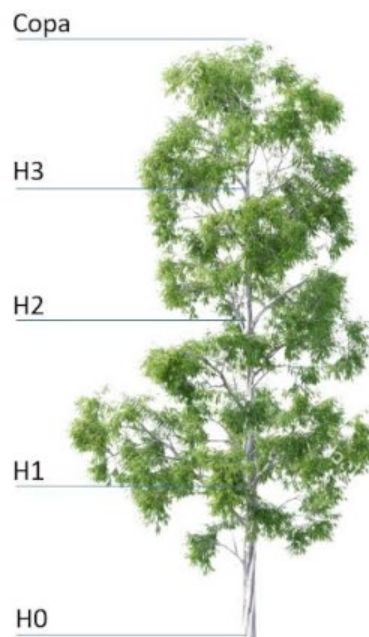
Nota. Mapa de elaboración propia utilizando el software QGIS versión 3.44.

En el presente trabajo, se utilizó una clasificación de la copa del árbol, dividiéndolo en 4 estratos consecutivos (figura 3), con el objetivo de facilitar el análisis y la interpretación de su estructura. Los estratos definidos son los siguientes: HO-H1, H1-H2, H2-H3, H3-Copa.

Cada uno de estos intervalos representa una subdivisión del árbol en las cuales se trabajó. Dado que los árboles presentaban alturas variables (véase las diferentes alturas en Tabla 1). y que además existieron limitaciones logísticas que impidieron definir con exactitud los mismos puntos de corte en altura para todos los individuos, los estratos verticales no se establecieron en base a proporciones exactas, sino de forma visual y práctica en campo, considerando la arquitectura de cada árbol por lo que debido a esto en el análisis se trabajó con proporciones en vez de estratos, para que sea comparable entre árboles.

Figura 3

Esquema representativo de los estratos (H0-H1; H1-H2; H2-H3; H3-Copa)



3.2 IAF

Se utilizará un analizador de dosel vegetal ("Plant Canopy Analyzer"), PCA, LAI-2200 para estimar el índice de área foliar (LAI) de los árboles de influencia del estudio, con una configuración de dos PCA o sensores ópticos; un dispositivo se dejará en un claro (a 150m del sitio) para registrar las condiciones de luz automáticamente cada 30 segundos, mientras que el otro PCA se usará manualmente debajo del dosel en los estratos definidos anteriormente como (H0-H1;H1-H2;H2-H3;H3-Copa) en dirección a los 4 puntos cardinales.

Todas las mediciones de PCA se realizarán en un campo de visión de 180°, en condiciones estables de luminosidad (dominadas por radiación difusa totalmente nublado o por radiación directa totalmente despejado).

3.3 Ceptómetro

Se utilizó el Ceptómetro AccuPAR LP-80 para la medición de radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) en dos direcciones, Este y Oeste, en todos los estratos del dosel. Las mediciones se realizaron en los siguientes estratos: HO-H1, H1-H2, H2-H3 y H3-Copa (Figura 3), obteniéndose un promedio de la radiación en cada uno de estos estratos. Estas mediciones fueron tomadas en cada ejemplar correspondiente (3 árboles de fila simple y 2 árboles en fila central de una triple fila) para *E. grandis* y *E. dunnii* y abarcando todos los estratos mencionados anteriormente.

3.4 Variables dendrométricas

Las variables dendrométricas medidas en los 10 árboles fueron: diámetro a la altura del pecho (DAP) mediante cinta diamétrica, altura de copa viva (HC) y altura total (Ht) mediante regla telescópica.

Tabla 1

Resultado de mediciones de variables dendrométricas

Árbol	DAP (cm)	Ht(m)	Hc (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)
B1SD	4.1	4.30	3.98	1.15	2.11	2.91
B2SD	3.5	3.60	3.45	1.13	2.11	2.74
B3SD	2.3	3.00	2.88	1.25	1.75	2.30
B1SG	5.6	5.25	5.00	1.22	2.48	3.55
B2SG	3.8	3.77	3.67	1.25	2.15	2.73
B3SG	4.1	4.71	4.61	1.40	2.70	3.55
B2TD	4.6	4.70	3.70	1.31	2.20	3.10
B3TD	3.5	4.80	4.29	1.24	2.24	3.16
B2TG	5.4	5.40	4.70	1.32	2.15	2.79
B3TG	4.1	4.60	4.20	1.44	2.45	2.98

Nota. SD corresponde a la fila simple de *Eucalyptus dunnii*, SG a la fila simple de *Eucalyptus grandis*, TD a la fila central de una triple fila de *E. dunnii* y TG a la fila central de una triple fila de *E. grandis*. B1, B2 y B3 representan los tres bloques del diseño experimental. DAP (cm) indica el diámetro a la altura del pecho (1,3 m); Ht (m) la altura total del árbol; Hc (m)

la altura de la copa viva. Los estratos verticales del dosel utilizados en las mediciones se definen como H0–H1, H1–H2, H2–H3 y H3–Copa.

3.5 Defoliación

Posterior a la adquisición de datos de luz, se procedió a la defoliación de los árboles, tres correspondientes a *E. dunnii* y tres a *E. grandis* en fila simple, siendo un árbol por bloque. Para la fila central de la triple fila se procedió a defoliar tanto para *E. grandis* como para *E. dunnii*, pero en este caso se defoliaron 2 ejemplares de cada uno correspondientes a dos bloques. En cada árbol se diferenciaron los 4 estratos mencionados anteriormente como (H0–H1; H1–H2; H2–H3; H3–Copa) y se colectaron la totalidad de hojas en bolsas diferentes para su posterior procesamiento. Los pesos de follaje fueron determinados mediante balanza digital.

3.6 WinDIAS

Se tomaron muestras representativas de hojas por cada estrato. Estas fueron escaneadas con el sistema WinDIAS (Delta-T Devices Ltd.) para determinar el área foliar (cm²), utilizada posteriormente en la estimación del índice de área foliar (IAF). A partir de esta submuestra, se seleccionó un conjunto adicional de hojas para el análisis de forma, procesadas también con el sistema WinDIAS. La selección de la submuestra se realizó de modo que fuera representativa de la población evaluada.

3.7 Análisis estadístico

Las comparaciones entre especies (*Eucalyptus grandis* y *E. dunnii*), arreglos espaciales (fila simple y triple fila) y estratos verticales se realizaron utilizando análisis de varianza (ANOVA) de una y dos vías, según correspondiera al diseño de cada variable. Las diferencias entre medias se evaluaron mediante pruebas post hoc de comparación múltiple con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Para el análisis del tamaño de hoja y del área foliar total por estrato, la unidad experimental considerada fue el árbol, y las mediciones de hojas individuales se promediaron previamente a nivel de estrato para evitar pseudo-replicación.

Las relaciones entre el índice de área foliar obtenido por el método indirecto (LAI-2200) y el método destructivo (WinDIAS) se evaluaron mediante regresión lineal simple,

considerando el IAF destructivo como variable de referencia. Se calcularon coeficientes de determinación (R^2) y se evaluó visualmente la presencia de sesgos sistemáticos.

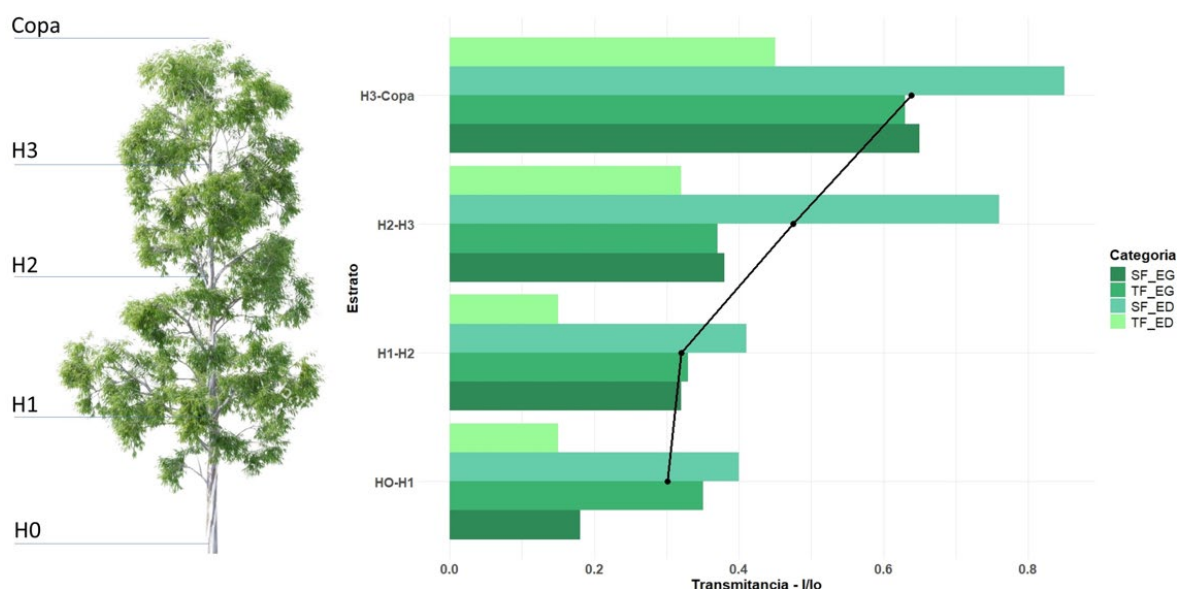
Los datos de transmitancia obtenidos con ceptómetro se analizaron mediante ANOVA de dos vías, empleando especie y estrato como factores. Los análisis se realizaron utilizando software estadístico R (v.4.x) o equivalente.

4. RESULTADOS

4.1 Distribución de la luz en canopias de *E. dunnii* y *E. grandis* en sistema silvopastoril

Figura 4

Delimitación de estratos y transmitancia promedio por tratamiento (línea negra).



En todos los tratamientos, se observó un aumento progresivo de la transmitancia con la altura del dosel (Figura 4). El estrato inferior (H0–H1) registró los valores más bajos de transmitancia, mientras que el estrato superior (H3–Copa) presentó los valores más altos. En promedio, la transmitancia en el estrato H3–Copa fue aproximadamente el doble que en los estratos H0–H1 y H1–H2.

Dentro del arreglo de fila simple, se observaron diferencias consistentes entre especies. En el estrato H0–H1, *E. grandis* presentó un valor de transmitancia 57% menor que *E. dunnii*. En los estratos H1–H2, H2–H3 y H3–Copa, las diferencias fueron de 22%, 50% y 11%, respectivamente, siempre con valores menores para *E. grandis*.

En cuanto al arreglo de triple fila, en la fila central se observaron diferencias entre especies de sentido opuesto al arreglo simple. En esta disposición, *E. grandis* presentó valores de transmitancia 58% mayores que *E. dunnii* en el estrato HO-H1.

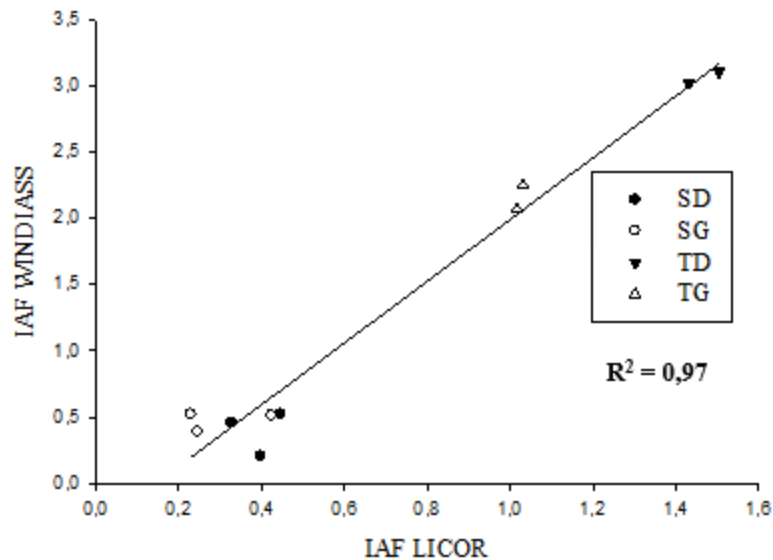
En la Figura 4 se observa que la especie *E. dunnii* muestra una marcada sensibilidad al tipo de arreglo espacial, con diferencias notorias entre la fila central de la triple fila y la fila

simple. Esta variación no se evidencia en *E. grandis*, donde el efecto del arreglo espacial resulta menos pronunciado los cambios en transmitancia. Estos resultados indican que la distribución de la luz dentro del dosel varió en función de la altura, la especie y el arreglo espacial. Las diferencias observadas entre tratamientos se detallan en la Figura 4.

4.2 Índice de área foliar estimado mediante Licor y WinDIAS

Figura 5

Relación entre IAF del LAI-2200 y área foliar medida con WinDIAS



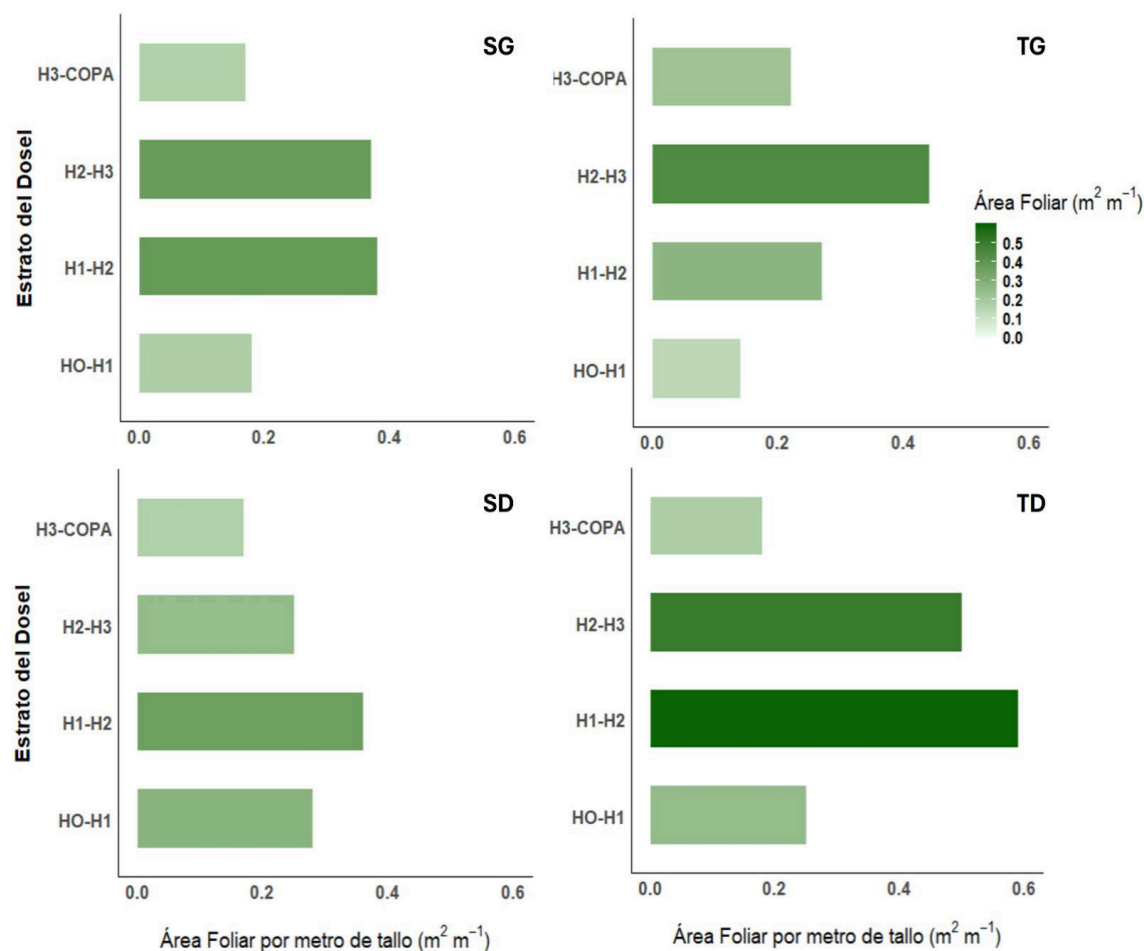
El valor de R^2 de 0.97 indica una relación fuerte entre el índice de área foliar medido con el Licor (2200) con respecto al estimado a través de las mediciones de área foliar mediante WinDIAS en el intervalo de datos disponible. Para la disposición simple en la especie *E. dunnii*, el valor de WinDIAS es ligeramente menor al de LICOR -0.8%, en cambio en la misma disposición simple, pero en la especie *E. grandis*, WinDIAS estimó un 51% más que LICOR.

En cuanto a la fila central de la triple fila tanto para *E. dunnii* como para *E. grandis*, las estimaciones mediante WinDIAS son considerablemente mayores respecto del LAI, con incrementos del 112% y 135%, respectivamente.

4.3 Promedio de Área Foliar Total (AFT) (m^2)

Figura 6

Área foliar total por metro de tallo para especies y arreglos



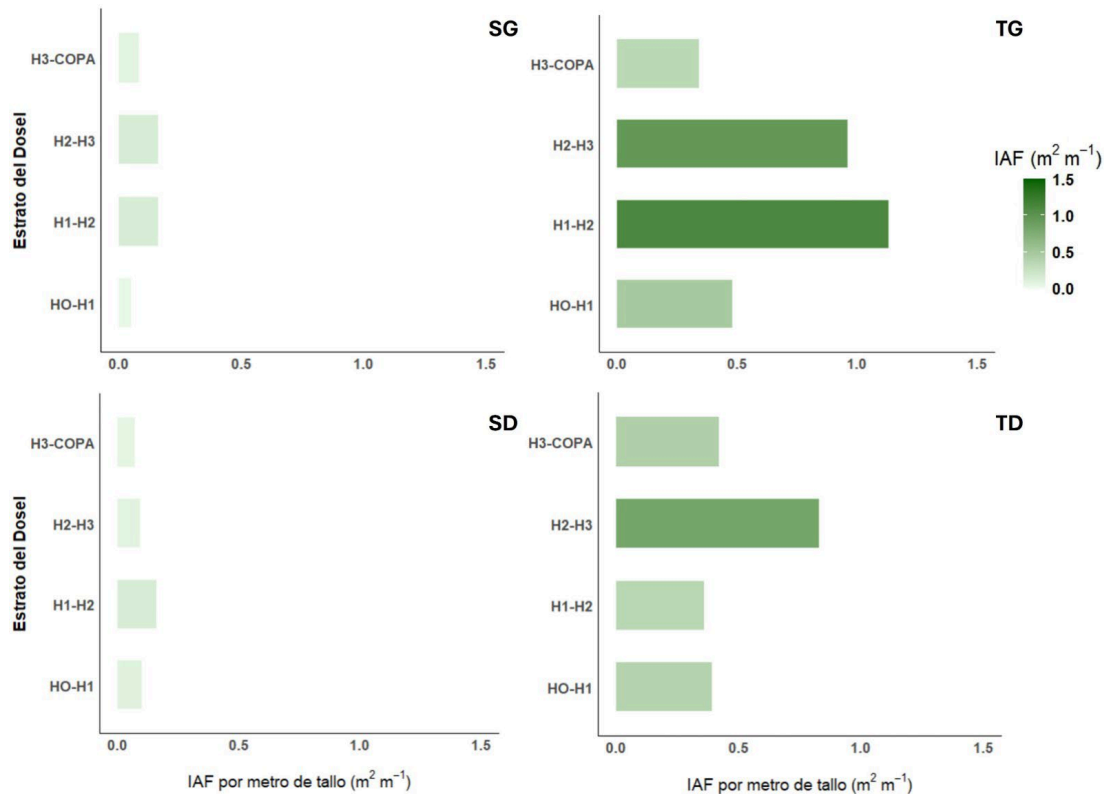
Este parámetro (AFT) representa la suma del área de todas las hojas dentro de cada estrato por metro de tallo, expresada en unidades de superficie ($\text{m}^2 \text{m}^{-1}$) para todos los tratamientos. En todos los tratamientos, se observaron variaciones en la distribución vertical del área foliar. En general, los estratos intermedios (H1–H2 y H2–H3) concentraron mayores valores de AFT. En todos los tratamientos se observaron variaciones verticales del AFT. Los estratos intermedios (H1–H2 y H2–H3) concentraron la mayor proporción del área foliar, con $\approx 66\%$ en fila simple y $\approx 75\text{--}78\%$ en triple fila. En triple fila, *E. grandis* concentró más área en la parte alta del dosel que *E. dunnii*: H0–H1 $\approx 8\%$ vs 15% , H3–Copa $\approx 15\%$ vs 10% , y la fracción por encima de H2 alcanzó $\approx 48\%$ (TG) frente a $\approx 44\%$ (TD). Por especie y arreglo, los aportes por estrato fueron: SG 17–33–33–17 %, SD 26–33–24–17 %, TG 8–44–34–15 %

y TD 15–41–34–10 % (H0–H1, H1–H2, H2–H3, H3–Copa, respectivamente). Cabe señalar que este gráfico muestra valores absolutos de área foliar por metro de tallo, no el índice de área foliar (IAF), el cual será analizado en la siguiente sección.

4.4 Índice de área foliar por estrato

Figura 7

IAF por metro de tallo, como superficie foliar por unidad de superficie de suelo proyectada (m^2/m^2).



Se observa que, en todos los casos, el IAF no se distribuye de manera homogénea a lo largo del dosel, sino que tiende a concentrarse en los estratos intermedios, particularmente en el segmento H1–H2 y, en algunos casos, también en H2–H3. Los estratos H3–Copa y H0–H1 presentan, en general, los valores más bajos de IAF, siendo estos la parte superior e inferior del dosel respectivamente.

Entre especies, *E. grandis* (SG y TG) muestra un IAF más elevado, especialmente en el estrato H1–H2 de la fila central de la triple fila (TG), alcanzando valores cercanos a 1.5

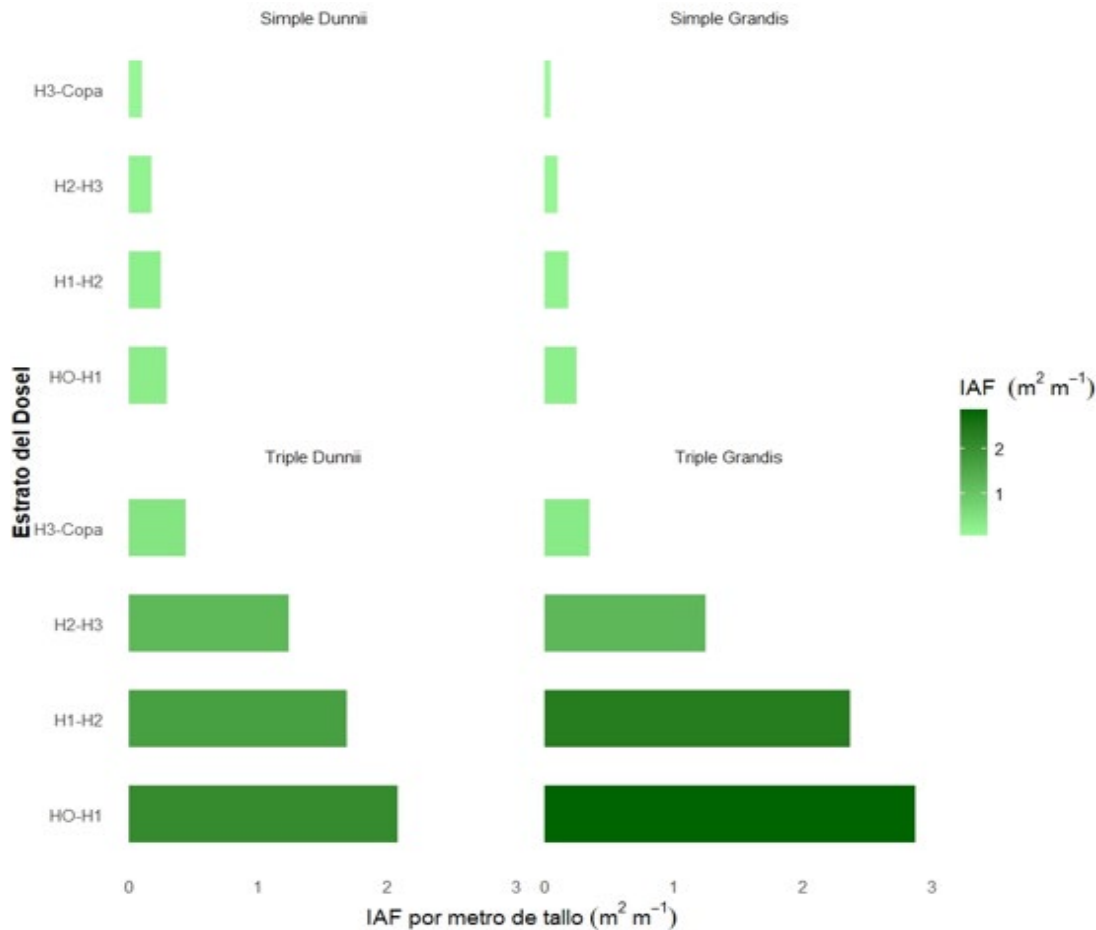
m²/m². En cambio, *E. dunnii* (SD y TD) presenta valores de IAF más bajos asociado a una altura de copa viva en *E. grandis* de 4,44 m en promedio y *E. dunnii* de 3,72m.

En cuanto al arreglo, se aprecia que la disposición en triple fila (TG y TD) tiende a presentar un mayor IAF en los estratos medios en comparación con la fila simple (SG y SD), lo que sugiere una mayor acumulación de biomasa foliar en estos sectores del dosel. La principal diferencia entre la disposición en fila simple y la fila central de una triple fila radica en el método de determinación del índice de área foliar (IAF), ya que depende directamente de la superficie de suelo asignada a cada árbol. En el caso de los árboles en fila simple, se consideró una superficie proyectada de 24,5 m² por individuo, mientras que, para los árboles ubicados en la fila central de la triple fila, la superficie asignada fue de 5,5 m². Esta diferencia responde al diseño del sistema de plantación y debe ser tomada en cuenta al interpretar los valores de IAF.

4.5 Índice de área foliar

Figura 8

IAF acumulado estimado mediante WinDIAS



Los valores acumulados correspondientes a los estratos se construyen de la siguiente manera: H3-Copa= H3-Copa; H2-H3= (H3-Copa) +(H2-H3); H1-H2= (H3-COPA+H2-H3+H1-H2 y HO-H1= H3-COPA+H2-H3+H1-H2+H0-H1, los mismos reflejan la cantidad total de superficie foliar interceptada por la radiación en su trayectoria descendente a través del dosel. *E. grandis* alcanzó valores de IAF acumulado promedio en el estrato inferior superiores a 3,0 mientras que *E. dunni* no superó los 2,5.

Además, las especies mostraron patrones contrastantes en la distribución vertical del área foliar. En *E. dunni*, el IAF se acumuló de forma más marcada en los estratos inferiores, especialmente en H0–H1 y H1–H2. En cambio, *E. grandis* presentó un aumento más gradual

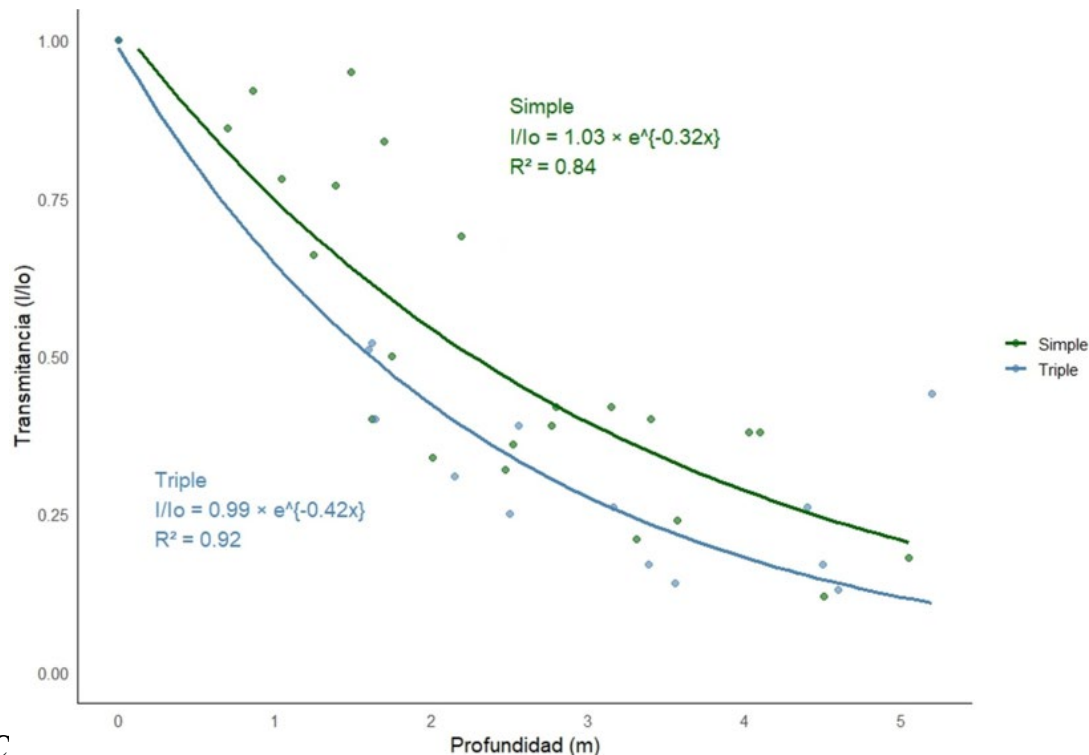
y homogéneo del IAF entre estratos, con una distribución más equilibrada a lo largo del perfil vertical del dosel.

Con relación al arreglo espacial, para ambas especies los valores de IAF acumulado fueron mayores en la fila central de la triple fila en comparación con la fila simple, lo cual está asociado a la diferencia en superficie de suelo asignada por árbol en cada tratamiento. No se utilizaron datos del equipo LAI-2200 para esta figura debido a inconsistencias observadas en los registros por estrato, que dificultaban su interpretación.

4.6 Transmitancia (I/I_0) en función de la profundidad de la copa por arreglo.

Figura 9

Transmitancia (%PAR) que atraviesa el dosel en función del arreglo espacial



C

La Figura 9. muestra la variación de la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa (expresada como la relación I/I_0) en función de la profundidad (m) de la copa bajo dos tipos de arreglos: un arreglo simple fila y la fila central de un arreglo en triple fila. En ambos casos, se observa una clara disminución exponencial de la transmitancia con la profundidad, reflejando una atenuación progresiva de la luz a medida que se avanza en el perfil del sistema explicada mediante un modelo exponencial: $I/I_0 = a e^{-bx}$.

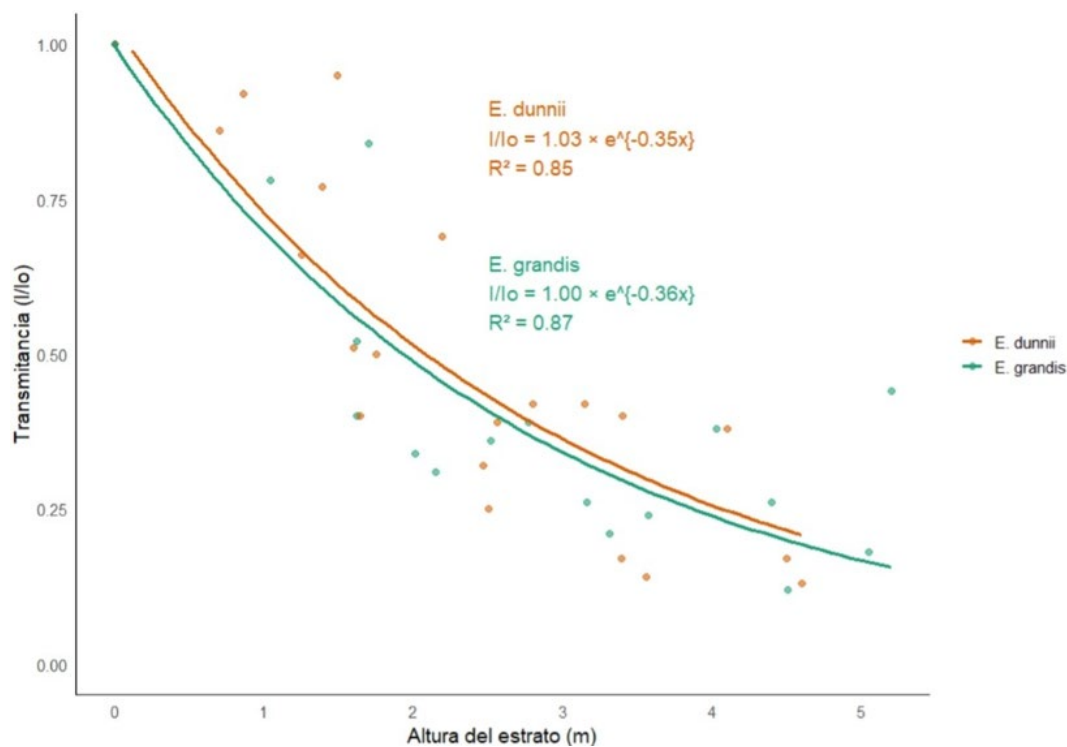
Para el arreglo simple, la relación fue ajustada por la ecuación $I/I_0 = 1.03 * e^{(-0.32 * x)}$, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.84. Esto indica un ajuste moderado del modelo exponencial a los datos observados, con una atenuación menos pronunciada de la luz en los primeros metros de profundidad.

En el caso de la fila central del arreglo triple, la ecuación resultante fue $I/I_0 = 0.99 * e^{(-0.42 * x)}$, con un R^2 de 0.92. Si bien también se evidencia una disminución exponencial, la luz disminuye más rápidamente en el arreglo de triple fila, indicado mediante el parámetro (-b) que al ser en términos absolutos mayor indica una pendiente mayor en el modelo.

4.7 I/I_0 (transmitancia) en función del IAF estimado mediante WinDIAS.

Figura 10

Figura 10 Transmitancia (%PAR) en función de la especie



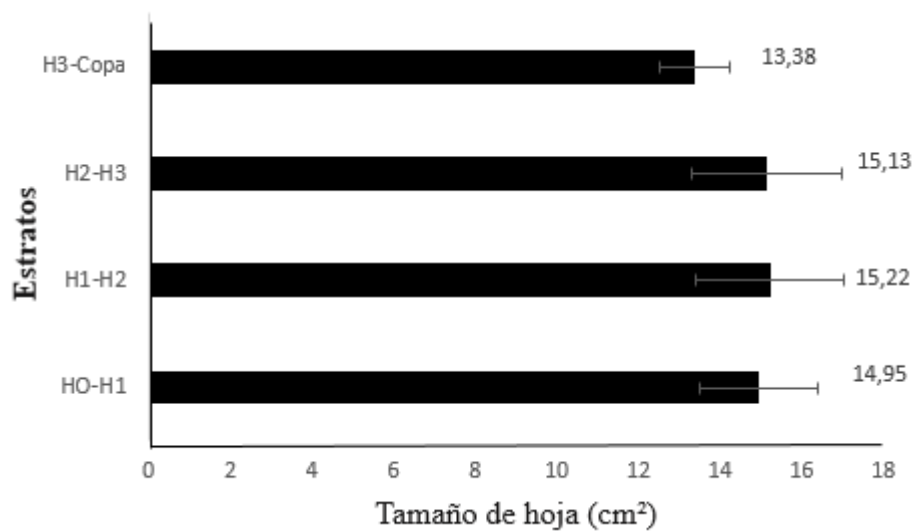
Se observa una clara tendencia decreciente en la transmitancia a medida que aumenta la profundidad en ambas especies, ajustándose a una función exponencial decreciente. Dado los parámetros especificados mediante dicha función los mismos presentan un comportamiento muy similar en cuanto a pendiente y calidad de ajuste del modelo por lo que se puede afirmar que la transmitancia se comporta de igual manera para las especies *E. dunnii* y *E. grandis*.

4.8 Variables foliares

4.8.1 Tamaño de hoja promedio por estrato.

Figura 11

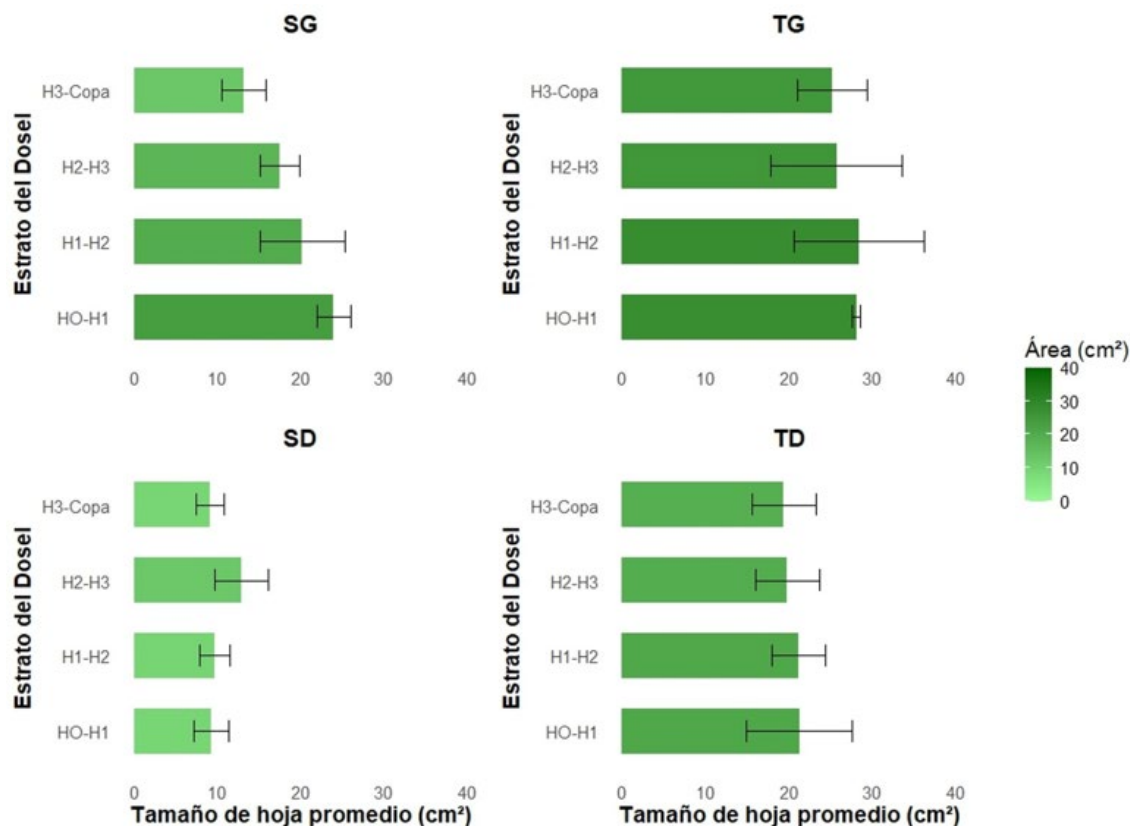
Tamaño de hoja promedio (cm²) en función de los estratos definidos.



Puede observarse en la figura 11. cierta semejanza en el tamaño de hoja (cm²) en todos los estratos, aunque el menor tamaño de hoja se da en el estrato superior, la cual en promedio es un 10% inferior al resto de los estratos.

4.8.2 Tamaño de hoja (cm²)**Figura 12**

Tamaño de hoja (cm²) para E. grandis y E. dunnii



En términos generales, el tamaño de hoja fue mayor en la disposición de triple fila que en la fila simple para ambas especies, con incrementos promedio de ≈ 20 – 25 % en *E. grandis* y ≈ 15 – 20 % en *E. dunnii*. A su vez, independientemente de la disposición tanto en fila simple como en la fila central de una triple fila, la especie con mayor tamaño de hoja es *E. grandis*. Si bien pueden observarse variaciones entre disposiciones, la tendencia general indica que *E. grandis* presenta hojas de mayor tamaño en comparación con *E. dunnii*.

En la figura 12 se puede observar un mayor tamaño de hoja en la especie *E. grandis* independientemente del estrato para la fila simple. En el estrato inferior (HO-H1) *E. dunnii* es un 38% menor con respecto a *E. grandis*. En el estrato (H1-H2) el tamaño de hoja de *E. dunnii* fue un 52% menor respecto de *E. grandis*. En el estrato correspondiente a H2-H3 la diferencia se asemeja al anterior estrato, siendo *E. dunnii* un 46% menor respecto de *E. grandis*. En el estrato superior del dosel se mantiene la inferioridad de *E. dunnii* respecto de

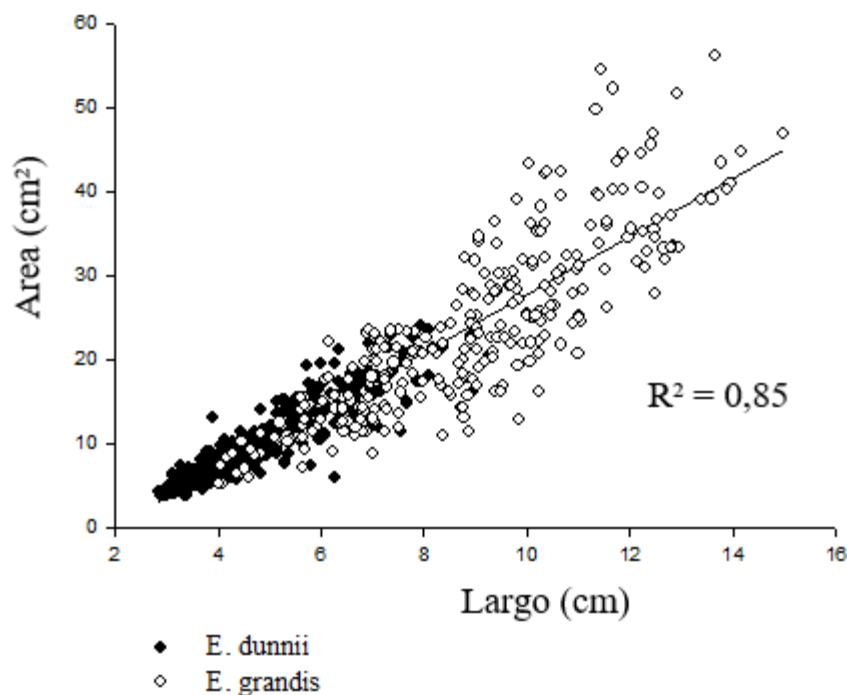
E. grandis con valor 20% menor siendo esta la menor diferencia. En la fila central de la disposición triple se puede apreciar tanto en *E. grandis* como *E. dunnii* un mayor tamaño de hoja en el estrato H2-H3.

Por otro lado, para la fila central de una triple fila se puede afirmar que *E. grandis* en promedio es un 13.29% mayor que *E. dunnii*. En los estratos HO-H1, H1-H2 *E. grandis* es un 30% mayor respecto a *E. dunnii*. Para el estrato H3-Copa *E. grandis* es un 10% mayor que *E. dunnii*.

4.8.3 Área de hoja (cm²) en función de largo (cm).

Figura 13

Relación lineal entre área de hoja y largo de hoja para *E. grandis* y *E. dunnii*



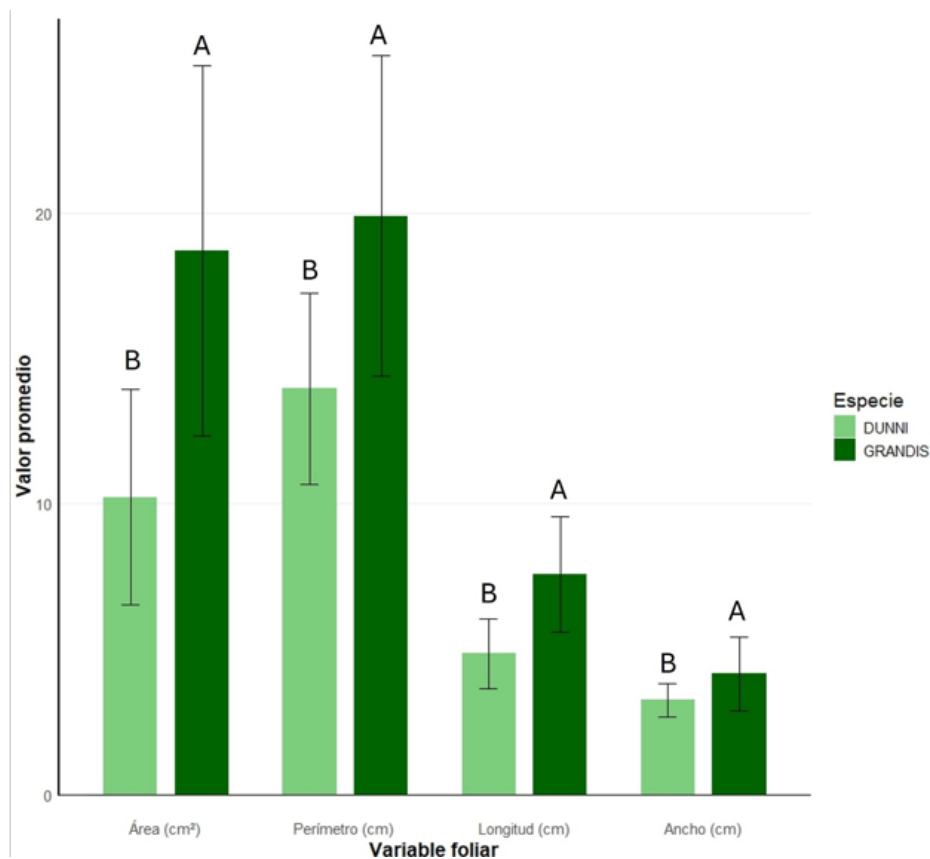
La gráfica muestra la relación entre el largo (cm) y el área (cm²) de hojas de *E. dunnii* (●) y *E. grandis* (○) independientemente del arreglo, dado de que presentan misma tendencia. Existe una correlación positiva entre el largo de la hoja y su área, lo que indica que a medida que el largo aumenta, el área también lo hace. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,85$) sugiere que el 85% de la variabilidad en el área de la hoja puede explicarse por el largo, lo que indica una relación muy fuerte. *E. grandis* (○) tiende a presentar hojas de mayor área en

comparación con *E. dunnii* (●). La dispersión de puntos en *E. grandis* es mayor, lo que sugiere una mayor variabilidad en el tamaño de sus hojas.

4.8.4 Promedios de área, perímetro, longitud y ancho foliar en *E. dunnii* y *E. grandis*

Figura 14

Comparación de variables foliares entre especies (media \pm desviación estándar, $p < 0,05$).

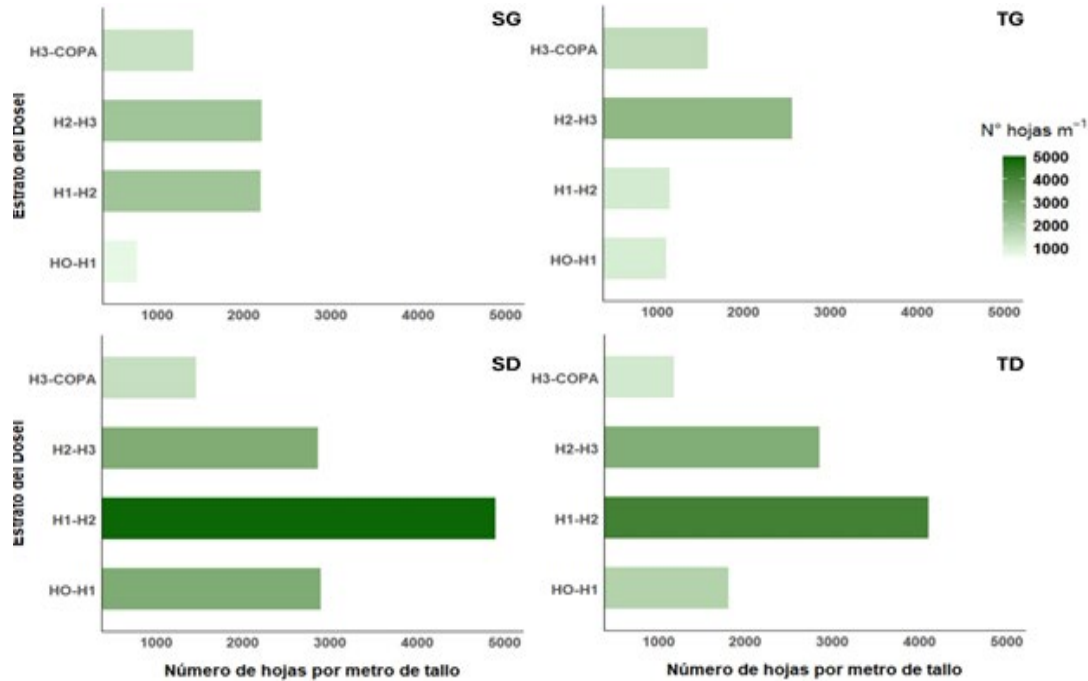


Se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre *E. dunnii* y *E. grandis* en todas las variables foliares analizadas. *E. grandis* presentó valores promedio superiores en área (cm²), perímetro (cm), longitud (cm) y ancho (cm) foliar, destacándose especialmente en las dos primeras. Estas diferencias indican un mayor desarrollo morfológico de las hojas en *E. grandis* en comparación con *E. dunnii*. Cabe destacar que no se observaron diferencias significativas entre arreglos para ninguna de las variables foliares analizadas, lo que indica que el efecto observado se debe exclusivamente a diferencias entre especies.

4.8.5 Numero de hojas

Figura 15

Número de hojas por especie, estrato y disposición en la fila.



La especie *E. dunnii* presenta un mayor número de hojas en todos los estratos en comparación con *E. grandis*, especialmente en los estratos inferiores. En *E. grandis*, la acumulación de hojas es más notoria en la copa, mientras que en *E. dunnii* hay una distribución más homogénea en los estratos intermedios y superiores. Para ambas especies, en la triple fila hay una mayor cantidad de hojas en la copa en comparación con la fila simple. En los estratos inferiores (H0-H1), la cantidad de hojas es menor en la triple fila. El número de hojas varía según la especie y la disposición de plantación.

5. DISCUSIÓN

El arreglo espacial mostro diferencias en las condiciones lumínicas dentro del dosel. En *E. dunnii* se observó una diferencia clara en los valores de transmitancia entre los tratamientos evaluados, lo que indica que el arreglo espacial constituye un factor determinante en las condiciones lumínicas dentro del dosel, afectando su arquitectura. La fila central de la triple fila presenta una menor transmitancia respecto a la fila simple en todos los estratos, lo que implica una mayor intercepción de radiación por parte del dosel. Esta reducción en la radiación disponible puede tener consecuencias sobre los procesos ecológicos del sotobosque, como la producción de biomasa forrajera o el desarrollo de plántulas y microorganismos dependientes de la luz. Desde una perspectiva funcional, la mayor cantidad de hojas en los estratos medios permite maximizar la intercepción de radiación a alturas donde la atenuación no es extrema, mejorando el balance entre asimilación de carbono y costos de respiración (Niinemets, 2010). Sin embargo, esta configuración también intensifica la reducción de radiación incidente sobre el sotobosque, lo que en sistemas silvopastoriles se traduce en menor crecimiento y cobertura del pasto bajo copa (Pezzopane et al., 2021).

En el caso de *E. grandis*, en los estratos H1-H2, H2-H3 y H3-Copa, no se observaron diferencias en la transmitancia de luz entre el arreglo en fila simple y la fila central de una triple fila a excepción del estrato más bajo. Esta similitud podría atribuirse al mayor desarrollo y expansión de la copa en los árboles dispuestos en fila simple, favorecido por la ausencia de competencia lateral, a diferencia de lo que ocurre en la fila central de la triple fila, donde los árboles se ven limitados por individuos adyacentes. La diferencia observada en *E. dunnii* entre arreglos podría estar relacionada con el efecto de la competencia lateral entre árboles, más intensa en la fila central, lo que induciría una mayor inversión en crecimiento apical para acceder a la luz, generando así una copa más desarrollada en altura, pero menos expandida lateralmente. Este patrón coincide con lo reportado en la literatura sobre competencia intraespecífica en plantaciones forestales, donde se ha demostrado que la competencia por luz en arreglos más densos estimula el alargamiento de los tallos y una redistribución del follaje hacia los estratos superiores del dosel (Smith et al., 1996; Stape et al., 2010). En contraste, árboles sin competencia lateral, como los de fila simple, pueden expandir sus copas de manera más uniforme, desarrollando un mayor volumen foliar en

estratos intermedios y bajos. El estrato más bajo correspondiente a HO-H1 la transmitancia fue menor para la disposición triple en la especie *E. dunnii*, los árboles en fila simple no enfrentan competencia lateral, lo que permitiría un mayor desarrollo de copas anchas y densas, con más acumulación de hojas. Esta mayor cobertura foliar contribuye a interceptar una mayor proporción de la radiación incidente, resultando en una menor transmitancia. Este comportamiento ha sido descrito en estudios de dinámica de dosel en plantaciones forestales, donde la densidad de plantación y la competencia influyen directamente en la forma de la copa, distribución del área foliar y, por ende, en la cantidad de luz que atraviesa el dosel (Forrester et al., 2013; Laclau et al., 2010).

En base a los valores de transmitancia registrados, *E. dunnii* mostró una mayor sensibilidad al diseño de, lo que se refleja en las diferencias más pronunciadas entre la disposición en fila simple y en triple fila para las variables (transmitancia, área foliar y número de hojas). Esta respuesta sugiere que *E. dunnii* es más susceptible a las variaciones en la densidad y disposición espacial, mientras que *E. grandis* mostró menor sensibilidad al cambio de arreglo con valores similares de transmitancia y un ligero aumento en el área foliar y número de hojas concentrada en los estratos superiores para triple fila. A nuestro conocimiento, no existen antecedentes que evalúen de forma explícita la interacción entre especie y diseño de plantación sobre la organización vertical del follaje y la transmisión de luz en sistemas silvopastoriles con *E. grandis* y *E. dunnii*, lo que confiere a estos resultados un carácter novedoso. Si bien el número de repeticiones limita la posibilidad de establecer inferencias estadísticas robustas, los resultados obtenidos aportan evidencia exploratoria relevante y generan hipótesis claras que deberán ser contrastadas en estudios futuros con mayor nivel de replicación. En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que la interacción entre especie y diseño de plantación determina la organización vertical del follaje y, en consecuencia, la transmisión de luz dentro del rodal. Estos patrones resaltan la importancia de considerar tanto la especie como el diseño espacial al planificar esquemas de plantación orientados a maximizar el uso eficiente de la luz y la sustentabilidad del sotobosque en sistemas silvopastoriles.

La altura de copa (HC) se mantuvo relativamente constante entre tratamientos, este indicador presenta limitaciones metodológicas, ya que en observaciones a campo se determina a partir de la primera rama con hojas vivas, sin contemplar la inclinación de la rama ni la longitud de

la misma. Esto implica que árboles con igual HC pueden diferir notablemente en el volumen efectivo de copa ocupado por follaje y en la distribución espacial de las hojas. Estudios previos han señalado que la arquitectura de las ramas y su ángulo de inserción influyen de manera determinante en la distribución vertical del área foliar y en la eficiencia de interceptación de la radiación (Niinemets & Kull, 1995; Stenberg, 1996). En consecuencia, la mayor acumulación de hojas en el estrato medio observada en SD y TD no estaría únicamente asociada a la altura de copa, sino también a patrones morfológicos de ramificación y a la longitud de las ramas, que generan diferencias en la densidad foliar efectiva entre tratamientos.

Independientemente del arreglo espacial, la transmitancia fue explicada por una función exponencial negativa, la cual indica que a medida que aumenta la profundidad en la copa la misma va disminuyendo. Este comportamiento ha sido documentado en sistemas forestales y silvopastoriles donde la arquitectura del dosel determina la distribución vertical de la radiación fotosintéticamente activa (RFA). Por ejemplo, Parker et al. (2002) describen un patrón similar en bosques templados, donde la transmitancia se reduce drásticamente en los primeros metros del dosel y luego se estabiliza hacia el sotobosque. En Uruguay, estudios realizados por Paez Altesor et al. (2021) en plantaciones de *E. dunnii* también identifican reducciones significativas de radiación fotosintéticamente activa en el sotobosque en función del diseño espacial y densidad arbórea, sin llegar a describir perfiles verticales detallados.

En relación a la estimación del Índice de Área Foliar (IAF), los resultados obtenidos mediante el método indirecto con el equipo LICOR y el método mediante análisis de imágenes en el WinDIAS indican una alta correlación, como se observa en la Figura 4. Sin embargo, no es posible concluir que ambos métodos sean plenamente equivalentes o apropiados para este tipo de trabajos, debido a la escasa cantidad de datos disponibles, lo cual limita la solidez estadística de dicha afirmación. Además, se observa una notable ausencia de datos en la zona media del gráfico (Figura 4), lo que compromete aún más la representatividad de la correlación y reduce la confiabilidad del ajuste en ese rango de valores de IAF para ambos métodos. Cabe destacar que el método indirecto de estimación del IAF mediante el LAI 2200 los únicos resultados tenidos en cuenta para el presente trabajo fueron los de árbol total, dado de que al momento de analizar las mediciones en los diferentes estratos proporciona datos atípicos e inconsistentes probablemente debido a la discontinuidad del dosel y a la presencia

de claros, que afectan el supuesto de homogeneidad foliar implícito en el modelo de Beer–Lambert sobre el cual se basa el instrumento (Weiss et al., 2004; Woodgate, 2012). Por otra parte, Lena et al. (2016) afirman que en plantas aisladas de *Jatropha* el LAI sobreestima el IAF en un 30% con respecto a un muestreo destructivo. En plantaciones jóvenes, la estimación de LAI mediante el LAI-2200/LAI-2000 puede presentar valores atípicos o inconsistentes debido a la influencia de la edad de los árboles en la estructura del dosel. Dovey y du Toit (2006) demostraron que, en eucaliptos de 2 años, el LAI-2000 tiende a subestimar el LAI real, mientras que en plantas de 3 años el mismo instrumento lo sobreestima. Estas diferencias se atribuyen a cambios en la densidad y continuidad de la copa a medida que los árboles crecen, lo que afecta la transmisión de radiación y, por ende, la estimación indirecta de LAI. Este comportamiento evidencia que las mediciones del LAI-2200/2000 en árboles jóvenes requieren interpretación cautelosa y, de ser posible, ajustes específicos o validación mediante métodos alternativos que consideren la heterogeneidad de la copa.

El análisis de la relación entre largo y área foliar mostró que *Eucalyptus grandis* presenta una mayor variabilidad en el largo de sus hojas en comparación con *E. dunnii*, mientras que el área tiende a seguir una tendencia similar entre especies. Esta mayor dispersión en el largo indica una plasticidad morfológica más elevada en *E. grandis*, que le permite ajustarse a variaciones microambientales, como la disponibilidad de luz y la posición dentro del dosel. Dicha variabilidad puede atribuirse, al menos en parte, a la coexistencia de hojas en distintos estados ontogénicos (juveniles, intermedias y adultas), característica bien documentada en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus* (Furtado et al., 2023). Estas diferencias en morfología foliar, que incluyen variaciones en forma, tamaño y orientación— contribuyen a una mayor heterogeneidad estructural dentro de la copa. Por el contrario, *E. dunnii* muestra hojas más homogéneas en sus dimensiones, reflejando un patrón de desarrollo más conservador. La comparación entre estratos de la planta también evidenció que, aunque ambas especies mantienen una relación positiva entre largo y área, *E. grandis* alcanza valores máximos de largo más altos, lo que sugiere que la variación interindividual es significativa incluso dentro de un mismo estrato. Estas diferencias morfológicas pueden tener implicancias directas en la eficiencia fotosintética, la captura de luz y la competencia intraespecífica, así como en la

uniformidad del dosel, factores críticos para el manejo y optimización de plantaciones juveniles de eucalipto (Furtado et al., 2023; King, 1999; Stape et al., 2010).

6. CONCLUSIONES

La transmitancia y la distribución vertical del follaje variaron en función del arreglo espacial de plantación, con efectos más marcados en *Eucalyptus dunnii*. Las diferencias observadas entre especies estuvieron asociadas tanto a la distribución del área foliar como a la altura de copa viva, lo que determinó patrones contrastantes de interceptación y atenuación de la luz dentro del dosel. Las diferencias estructurales y lumínicas detectadas representan una etapa inicial del desarrollo del dosel. A medida que aumente la cobertura y se intensifique la competencia, es esperable que los contrastes entre arreglos y especies se acentúen.

En cuanto a la estimación del índice de área foliar (IAF), se observó una correlación consistente entre ambos métodos empleados, aunque la escasez de datos disponibles limita la precisión del ajuste. Por lo tanto, se recomienda incrementar el número de árboles medidos en futuras evaluaciones, a fin de mejorar la representatividad y robustez estadística de las estimaciones.

Este estudio logró cumplir con los objetivos planteados, caracterizando la distribución vertical de la luz dentro del dosel de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*. La integración de mediciones estructurales y lumínicas permitió describir cómo se organiza el dosel en etapas iniciales y establecer una base cuantitativa para futuros monitoreos, especialmente en fases más avanzadas donde la competencia y el cierre de copas modifiquen de manera más evidente el ambiente lumínico y la distribución del área foliar.

7. BIBLIOGRAFIA

- Adams, J. E. (1966). Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion. *Soil Science Society of America Journal*, 30(1), 110-114.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000010036x>
- Alao, J. S., & Shuaibu, R. B. (2013). Agroforestry practices and concepts in sustainable land use systems in Nigeria. *Journal of Horticulture and Forestry*, 5(10), 156-159.
- Bahamonde, H. A., Peri, P. L., Martínez Pastur, G., & Lencinas, M. V. (2009). Variaciones microclimáticas en bosques primarios y bajo uso silvopastoril de *Nothofagus antártica* 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.
- Besteiro, S. I., & Rodríguez Vagaría, A. M. (2012). Redistribución de las precipitaciones sobre plantaciones forestales en un predio del partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 111(2), 75-82.
- Binkley, D., Campoe, O. C., Gspaltl, M., & Forrester, D. I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 288, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>
- Bond, T. E., & Kelly, C. F. (1955). The globe thermometer in agricultural research. *Agricultural Engineering*, 36(4), 251-255.
- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- Bussoni, A., Álvarez, J., Cubbage, F., Ferreira, G., & Picasso, V. (2019). Diverse strategies for integration of forestry and livestock production. *Agroforestry Systems*, 93(1), 333-344. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0092-7>
- Cabrelli, D., Rebottaro, S., & Effron, D. (2006). Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Quebracho*, (13), 17-25.

- Chianucci, F. (2015). A note on estimating canopy cover from digital cover and hemispherical photography. *Silva Fennica*, 50(1), Artículo e1518. <https://doi.org/10.14214/sf.1518>
- Churchman, C. W. (1968). *The systems approach*. Delta Book.
- Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Brauer, D. K., Howell, T. A., Tolk, J. A., & Copeland, K. S. (2017). Allometric method to estimate leaf area index for row crops. *Agronomy Journal*, 109(3), 883-894. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.11.0665>
- Comisión Nacional de Fomento Rural & Universidad de la República (Eds.). (2016). *La integración de forestaciones en predios familiares: Resultados de un estudio participativo*. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15316/1/Integracion-de-forestaciones-en-predios-familiares-CNFR-2016.pdf>
- Compendio de suelos del Uruguay*. (s.f.). [Software]. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/compendio-suelos-del-uruguay>
- Cruz, P. (1997). Effect of shade on the carbon and nitrogen allocation in a perennial tropical grass, *Dichanthium aristatum*. *Journal of Experimental Botany*, 48(1), 15-24. <https://doi.org/10.1093/jxb/48.1.15>
- Cubbage, F., Balmelli, G., Bussoni, A., Noellemeyer, E., Pachas, A. N., Fassola, H., Colcombet, L., Rossner, B., Frey, G., Dube, F., de Silva, M., Stevenson, H., Hamilton, J., & Hubbard, W. (2012). Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*, 86, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9482-z>
- Daughtry, C. S. T. (1990). Direct measurements of canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, 5(1), 45-60. <https://doi.org/10.1080/02757259009532121>
- De Sousa, C. L., & Ponzoni, F. (1998). Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus* spp. En *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 1537-1547). INPE.

- Deng, J., Fang, S., Fang, X., Jin, Y., Kuang, Y., Lin, F., Liu, J., Ma, J., Nie, Y., Ouyang, S., Ren, J., Tie, L., Tang, S., Tan, X., Wang, X., Fan, Z., Wang, Q.-W., Wang, H., & Liu, C. (2023). Forest understory vegetation study: Current status and future trends. *Forestry Research*, 3, Artículo e6. <https://doi.org/10.48130/FR-2023-0006>
- Deniz, M., de Sousa, K. T., Moro, M. F., do Vale, M. M., Dittrich, J. R., Machado Filho, L. C. P., & Hötzel, M. J. (2021). Social hierarchy influences dairy cows' use of shade in a silvopastoral system under intensive rotational grazing. *Applied Animal Behaviour Science*, 244, Artículo e105467. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105467>
- Devkota, N. R., Kemp, P. D., Hodgson, J., Valentine, I., & Jaya, I. K. D. (2009). Relationship between tree canopy height and the production of pasture species in a silvopastoral system based on alder trees. *Agroforestry Systems*, 76(2), 363-374. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9192-8>
- Dirección General Forestal. (2022). *Iniciativa para el Río Negro: Fortalecimiento de las capacidades de gestión para la protección del Bosque Nativo de la Cuenca*. MGAP <https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/Informe%20Final%201-7.pdf>
- Dirección General Forestal. (2025). *Superficie forestal del Uruguay (bosques plantados): Período 1975-2023*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2025-02/Superficie%20Plantado%20Informe%202024.pdf>
- Djimde, M., Torres, F., & Migongo-Bake, W. (1989). Climate, animal and agroforestry. En W. S. Reifsnyder & T. O. Darnhofer (Eds.), *Meteorology and agroforestry* (pp. 463-470). ICRAF.
- Dogliotti Perrone, G. (2024). *Análisis de sistemas silvopastoriles con Eucalyptus grandis: Segmentación de copas, microambiente y productividad del campo natural* [Tesis de maestría]. Universidad de la República

- Dovey, S. B., & du Toit, B. (2006). Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. *Trees*, 20(3), 273-277.
<https://doi.org/10.1007/s00468-005-0038-y>
- Durán, A., & García Préchac, F. (2007). *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 2). Hemisferio Sur.
- Fedrigo, J., 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., Santa Cruz, R., Benitez, V., Courdin, V., Ferreira, G., Posse, J., & Viñoles, C. (2017). Microclima en sistemas silvopastoriles. En J. Chará, P. Peri, J. E. Rivera, E. Murgueitio, & K. Castaño (Eds.), *Sistemas silvopastoriles: Aportes a los objetivos de desarrollo sostenible* (pp. 130-135). CIPAV.
- Forrester, D. I., Collopy, J. J., Beadle, C. L., & Baker, T. G. (2013). Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on light interception and light-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 288(1), 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.024>
- Furtado, E. L., da Silva, A. C., Silva, É. A. R., Rodella, R. A., Soares, M. A., Serrão, J. E., de Pieri, C., & Zanuncio, J. C. (2023). Morphoanatomical changes in *Eucalyptus grandis* leaves associated with resistance to *Austropuccinia psidii* in plants of two ages. *Plants*, 12(2), Artículo e353. <https://doi.org/10.3390/plants12020353>
- Gandullo, J. M. (1994). *Climatología y ciencias del suelo*. Dextra.
- Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morisette, J. T., Weiss, M., Nickeson, J. E., Fernandes, R., Plummer, S., Shabanov, N. V., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., & Yang, W. (2008). Validation and intercomparison of global leaf area index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2), Artículo eG02028. <https://doi.org/10.1029/2007JG000635>

- Gastal, F., & Lemaire, G. (2002). N uptake and distribution in crops: An agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 789-799. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789>
- Grantz, D. A. (1990). Plant response to atmospheric humidity. *Plant, Cell & Environment*, 13(7), 667-679.
- Guangjian, Y., Ronghai, H., Jinghui, L., Marie, W., Hailan, J., Xihan, M., Donghui, X., & Wuming, Z. (2019). Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>
- Gyenge, J. E., Fernández, M. E., Dalla Salda, G., & Schlichter, T. M. (2002). Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: Water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. *Agroforestry Systems*, 55, 47-55.
- Jemal, H., & Lemma, A. (2015). Review on major factors affecting the successful conception rates on biotechnological application (AI) in cattle. *Global Journal of Medical Research*, 15(3), 19-27.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35.
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- King, D. A. (1999). Juvenile foliage and the scaling of tree proportions, with emphasis on *Eucalyptus*. *Ecology*, 80(6), 1944-1954. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1944:JFATSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1944:JFATSO]2.0.CO;2)
- King, K. F. S. (1979). Concepts of agroforestry. En T. Chandler & D. Spurgeon (Eds.), *International cooperation in agroforestry* (pp. 1-13). ICRAF.
- Kolmans, E., & Vásquez, D. (1996). *Manual de agricultura ecológica: Una introducción a los principios básicos y su aplicación*. ACTAF.

- Laclau, J.-P., Ranger, J., Gonçalves, J. L., Maquère, V., Krusche, A. V., Thongo M'Bou, A., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.-P., Piccolo, M., & Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1771-1785. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>
- Lee, R. (1978). *Forest microclimatology*. Columbia University Press.
- Lena, B. P., Folegatti, M. V., Francisco, J. P., Santos, O. N. A., & Andrade, I. P. S. (2016). Performance of LAI-2200 plant canopy analyzer on Leaf Area Index of jatropha nut estimation. *Journal of Agronomy*, 15(4), 191-197. <https://doi.org/10.3923/ja.2016.191.197>
- Modernel, P., Rossing, W. A. H., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., & Tiftonell, P. (2016). Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11(11), Artículo e113002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113002>
- Munka, C. (2017). Microclima en sistemas silvopastoriles. En C. Viñoles, J. K. Fedrigo, V. Benítez, & R. Santa Cruz (Eds.), *I Seminario en Sistemas Silvopastoriles: Producción integrada para maximizar la rentabilidad* (pp. 63-68). Polo Agroforestal. <https://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/Revista-I-Integraci%C3%B3n-Ganader%C3%ADa-Forestal.pdf>
- Munka, C., Bussoni, A., Boscana, M., Alvarez, J., Rachetti, M., Cabrera, G., & Fernandez, E. (2017). Forestación en predios ganaderos del sur del Uruguay: Evaluación del ambiente térmico. En J. Chará, P. Peri, J. E. Rivera, E. Murgueitio, & K. Castaño (Eds.), *Sistemas silvopastoriles: Aportes a los objetivos de desarrollo sostenible* (pp. 147-166). CIPAV.
- Munka Moreno, M. (2010). *Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en Pinus taeda debido al manejo silvicultural* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.

- Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R., Cuartas, C., & Naranjo, J. (2014). Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(3), 501-507.
- Nafarrate-Hecht, A. C., Dupuy-Rada, J. M., George-Chacon, S. P., & Hernández-Stefanoni, J. L. (2018). Modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución. *Madera y Bosques*, 24(3) Artículo e2431666. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431666>
- Niinemets, Ü. (2010). A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research*, 25(4), 693-714. <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0712-4>
- Niinemets, Ü., & Kull, O. (1995). Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*: Variation in needle morphology. *Tree Physiology*, 15(5), 307-315. <https://doi.org/10.1093/treephys/15.5.307>
- Nilson, T., Kuusk, A., Lang, M., Pisek, J., & Kodar, A. (2011). Simulation of statistical characteristics of gap distribution in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 895-905. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.02.009>
- Orihuela, A. N. (2000). Some factors affecting the behavioural manifestation of oestrus in cattle: A review. *Applied Animal Behaviour Science*, 70(1), 1-16.
- Paciullo, D. S. C., Fernandes, P. B., Carvalho, C. A. B., Morenz, M. J. F., Lima, M. A., Maurício, R. M., & Gomide, C. A. M. (2021). Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred dairy heifers. *Livestock Science*, 245, Artículo e104426. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104426>
- Paciullo, D. S. C., Gomide, C. D. M., Castro, C. D., Maurício, R. M., Fernandes, P. B., & Morenz, M. J. F. (2017). Morphogenesis, biomass and nutritive value of *Panicum maximum* under different shade levels and fertilizer nitrogen rates. *Grass and Forage Science*, 72(3), 590-600. <https://doi.org/10.1111/gfs.12264>

- Paez Altesor, F., Salvo Vera, J., & Zaballa Lotito, M. (2021). *Caracterización microclimática y desempeño forrajero de Lolium multiflorum en un sistema silvopastoril de Eucalyptus dunnii* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/40615>
- Parde, J. (1978). *El microclima del bosque en ecología forestal*. Mundi Prensa.
- Parker, G. G., Davis, M. M., & Chapotin, S. M. (2002). Canopy light transmittance in Douglas-fir-western hemlock stands. *Tree Physiology*, 22(2-3), 147-157. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.2-3.147>
- Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. D. C., Azenha, M. V., Oliveira, P. P. A., Bosi, C., Pedroso, A. D. F., & Esteves, S. N. (2020). Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: Shading and management effects. *Scientia Agricola*, 77, Artículo e20180150.
- Pezzopane, J. R. M., Bosi, C., Bernardi, A. C., Muller, M. D., & de Oliveira, P. P. A. (2021). Managing *eucalyptus* trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 312, Artículo e107350. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>
- Pezzopane, J. R. M., Bosi, C., Nicodemo, M. L. F., Santos, P. M., da Cruz, P. G., & Parmejiani, R. S. (2015). Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. *Bragantia*, 74(1), 110-119. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0334>
- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Pollock, K. M., Mead, D. J., & McKenzie, B. A. (2009). Soil moisture and water use by pastures and silvopastures in a sub-humid temperate climate in New Zealand. *Agroforestry Systems*, 75, 223-238. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9172-z>

- Ríos, N., Cárdenas, A., Andrade, H., Ibrahim, M., Jiménez, F., Sancho, F., Ramírez, E., Reyes, B., & Woo, A. (2007). Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, (45), 66-71.
- Rovira, P., & Velazco, J. (2012). Condiciones ambientales generadas por distintos tipos de sombra para el ganado. En P. Rovira (Ed.), *Uso de la sombra en la recría de novillos en sistemas pastoriles de la región este del Uruguay* (pp. 31-35). INIA.
- Rozados-Lorenzo, M. J., González-Hernández, M. P., & Silva-Pando, F. J. (2007). Pasture production under different tree species and densities in an Atlantic silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 70(1), 53-62.
- Ryu, Y., Nilson, T., Kobayashi, H., Sonnentag, O., Law, B. E., & Baldocchi, D. D. (2010). On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 463-472.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.009>
- 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: Informe final*. MA; MGAP; GEF; PNUD. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-04/informe_final.pdf
- Santiago, L. S., Goldstein, G., Meinzer, F. C., Fownes, J. H., & Mueller-Dombois, D. (2000). Transpiration and forest structure in relation to soil waterlogging in a Hawaiian montane cloud forest. *Tree Physiology*, 20(10), 673-681.
<https://doi.org/10.1093/treephys/20.10.673>
- Savsani, H. H., Padodara, R. J., Bhadaniya, A. R., Kalariya, V. A., Javia, B. B., Ghodasara, S. N., & Ribadiya, N. K. (2015). Impact of climate on feeding, production and reproduction of animals: A review. *Agricultural Reviews*, 36(1), 26-36.
<https://doi.org/10.5958/0976-0741.2015.00003.3>

- Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, P. M. S. (1996). *The practice of silviculture: Applied forest ecology* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Sotelo, F., Coore, N., Soares de Lima, G., Hernández, C., Bertoncelli, P., & Fedrigo, J. K. (2021). El árbol y sus efectos en el microclima y en la productividad de forraje. En J. E. Rivera, L. Colcombet, R. Santos-Gally, E. Murgueitio, M. Díaz, R. M. Mauricio, P. Peri & J. Chará (Eds.), *Actas del XI Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles y I Congreso de la Red Global de Sistemas Silvopastoriles* (pp. 315-324). CIPAV. <https://hdl.handle.net/20.500.12381/567>
- Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., Silva, C. R., Silva, S. R., Hakamada, R. E., Ferreira, J. M. de A., Lima, A. M. N., Gava, J. L., Leite, F. P., Andrade, H. B., Alves, J. M., Silva, G. G. C., & Azevedo, M. R. (2010). The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012>
- Stenberg, P. (1996). Simulations of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients in intercepted light by conifer canopies. *Tree Physiology*, 16(1-2), 99-108.
- Su, S., Jin, N., & Wei, X. (2024). Effects of thinning on the understory light environment of different stands and the photosynthetic performance and growth of the reforestation species *Phoebe bournei*. *Journal of Forestry Research*, 35(1), Artículo e6. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01651-0>
- Tamosiunas, M. (2015). La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: La visión del productor. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 150-157.
- Vieira, F. M. C., Militão, E. R., Wagner Junior, A., Herbut, P., Mayer, L. R. R., Vismara, E. D. S., Vieira, A. M. C., Paris, W., Hermes, C., & Paśmionka, I. B. (2021). Impact of shading of a silvopastoral system on microclimate and botanical composition of polyphytic pasture: A preliminary study in the subtropics. *Journal of Ecological Engineering*, 22(10), 215-224. <https://doi.org/10.12911/22998993/142206>

- Vieira Junior, N. A., Evers, J., Vianna, M. d. S., Pedreira, B. C. e, Pezzopane, J. R. M., & Marin, F. R. (2022). Understanding the arrangement of Eucalyptus-Marandu palisade grass silvopastoral systems in Brazil. *Agricultural Systems*, 196, Artículo e103316. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103316>
- Wang, S., Li, Q., Peng, J., & Niu, H. (2023). Effects of long-term cold stress on growth performance, behavior, physiological parameters, and energy metabolism in growing beef cattle. *Animals*, 13(10), Artículo e1619. <https://doi.org/10.3390/ani13101619>
- Waring, R. H. (1983). Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Advances in Ecological Research*, 13, 327-354.
- Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11(1), 41-76.
- Webster, J., Stewart, M., Rogers, A., & Verkerk, G. (2008). Assessment of welfare from physiological and behavioural responses of New Zealand dairy cows exposed to cold and wet conditions. *Animal Welfare*, 17(1), 19-26. <https://doi.org/10.1017/s0962728600031948>
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 37-53.
- Wheelock, J. B., Rhoads, R. P., VanBaale, M. J., Sanders, S. R., & Baumgard, L. H. (2010). Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 93(2), 644-655. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2295>
- Woodgate, W. L. (2012). An intercomparison of passive terrestrial remote sensing technologies to derive LAI and canopy cover metrics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 457-462. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-457-2012>
- Wythers, K., Reich, P., & Turner, D. (2003). Predicting leaf area index from scaling principles: Corroboration and consequences. *Tree Physiology*, 23(17), 1171-1179.

- Young, A. (1997). *Agroforestry for soil management* (2nd ed.). CABI.
- Zhang, Y., Chen, J. M., & Miller, J. R. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 166-181. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.09.009>