



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
INGENIERÍA FORESTAL

**COMPARACIÓN DE TASAS DE EVAPOTRASPIRACIÓN ENTRE**  
**GENOTIPOS DE *Eucalyptus globulus* Labill, *E. nitens* Deane & Maiden E**  
**HIBRIDOS DE *E. nitens* x *globulus***

Tesis de pregrado presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de  
Concepción para optar al título profesional de  
Ingeniero Forestal

POR: Francisco Esteban Muñoz Campos

Profesor Guía: Rafael Alejandro Rubilar Pons

Concepción, Chile 2022

© 2023

Francisco Esteban Muñoz Campos

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

**COMPARACIÓN DE TASAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ENTRE  
DIFERENTES GENOTIPOS DE *Eucalyptus globulus* Labill, *E. nitens* Deane &  
Maiden Y *E. nitens x globulus***

Profesor Patrocinante



---

Rafael Rubilar Pons  
Profesor Asociado  
Ingeniero Forestal, PhD

Profesor Patrocinante



---

Santiago Yépez Figueroa  
Profesor Asistente  
Ingeniero Geólogo, PhD

Calificación de la Habilitación Profesional (o Proyecto de Título):

Rafal Rubilar Pons: 6,5 (Seis coma cinco).

Santiago Yépez Figueroa: 6,5 (Seis coma cinco).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a mi familia, por brindarme el constante apoyo durante este proceso, a mi madre y padre por la compañía y valiosos consejos durante estos años que me facilitaron totalmente el poder sobrellevar los difíciles momentos pasados.

A mis hermanos Iván y Carolina por siempre creer en mí, que podía lograr sacar adelante en esta etapa de mi vida, y sobre todo subirme el ánimo cada día complicado durante este período, muchas gracias.

Al profesor Rafael Rubilar por acompañarme en este proyecto y hacer que todo fuera más simple, por sus consejos y recomendaciones que me dieron la confianza para poder sacar adelante el proyecto, y por sobre todo su paciencia durante el proceso.

Además, un especial agradecimiento al proyecto Fondecyt 1109835 y al proyecto ANID BASAL FB210015 que hicieron posible la realización de esta tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
INDICE DE TABLAS .....	vii
I. RESUMEN .....	viii
II. ABSTRACT .....	ix
III. INTRODUCCIÓN .....	1
IV. METODOLOGÍA .....	6
2.1 Descripción del área de estudio .....	6
2.2 Diseño experimental .....	7
2.3 Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	7
2.3.1 Ecuación Priestley-Taylor .....	8
2.4 Estimación de área foliar (LAI) .....	10
2.5 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) .....	10
2.5 Análisis estadístico .....	11
V. RESULTADOS .....	12
3.1 Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) .....	13
3.2 Estimación de índice de área foliar (LAI) .....	14
3.3 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) .....	15
3.4 Análisis estadístico .....	16
3.4.1 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) acumulada anual .....	16
3.4.2 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) mensual mayor .....	18
3.4.3 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) mensual menor .....	20
3.4.4 Evapotranspiración real (ET <sub>r</sub> ) estacional. ....	21
VI. DISCUSIÓN .....	24
VII. CONCLUSIONES .....	27
VIII. BIBLIOGRAFÍA .....	28
IX. ANEXOS .....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Variables asociadas a un balance hídrico. ....	3
<b>Figura 2.</b> Mapa de ubicación del área de estudio. ....	6
<b>Figura 3.</b> Diagrama ombrotérmico que ilustra el comportamiento de la precipitación y temperatura a nivel mensual para el área de estudio en el año 2020. ....	12
<b>Figura 4.</b> Gráfico de distribución de precipitaciones (Pp) en al año 2020 versus la distribución mensual de evapotranspiración de referencia (ETo) para el mismo año. ....	13
<b>Figura 5.</b> Gráfico de resultados de medición de índice de área foliar (LAI) para todos los genotipos considerados el año de estudio. ....	14
<b>Figura 6.</b> Gráfico con evapotranspiraciones reales (ETr) mensuales estimadas para de cada genotipo y curvas promedio ajustadas a nivel de especie. ....	16
<b>Figura 7.</b> Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) anual acumulada para el año de estudio. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	17
<b>Figura 8.</b> Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) máxima mensual según cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	19
<b>Figura 9.</b> Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) mínima mensual según cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	21
<b>Figura 10.</b> Gráfico de evapotranspiración real (ETr) acumulada por estación del año para cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	22

<b>Figura 11.</b> Gráfico de evapotranspiración real (ETr) media diaria por estación del año para cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	22
<b>Figura 12.</b> Gráfico de consumo hídrico en $l arb^{-1}$ acumulado por genotipo y estación. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos. ....	23

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Modelos finales seleccionados para estimación del índice de área foliar (LAI). ....	15
<b>Tabla 2.</b> Análisis de varianza (ANOVA) para las evapotranspiraciones reales (ETr) acumuladas anuales. ....	17
<b>Tabla 4.</b> Análisis estadístico de diferencia de varianzas (ANOVA) para la evapotranspiración real (Etr) mínima a nivel mensual. ....	19
<b>Tabla 5.</b> Tabla de resultados del test de Tukey para la evapotranspiración máxima mensual entre los genotipos estudiados. ....	19
<b>Tabla 6.</b> Análisis estadístico de diferencia de varianzas (ANOVA) para la evapotranspiración real (Etr) menor a nivel mensual ....	21

## I. RESUMEN

En base al contexto mundial de cambio climático y déficit hídrico, ha aumentado el interés por estudiar el uso de agua de cultivos, tanto agrícolas como forestales. Para el presente estudio, se estimó la evapotranspiración real (ecuación modificada de Priestley-Taylor) para cinco genotipos divididos en especies de *Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus nitens* Deane & Maiden y *Eucalyptus nitens x globulus*. El estudio se desarrolló en la comuna de Yumbel, Región del Biobío, dentro de las dependencias del vivero Carlos Douglas perteneciente a Forestal Mininco, donde se establecieron tres bloques siendo estas las repeticiones, las plantas fueron plantadas a una separación de 3 x 2 m. Las parcelas de experimentación fueron conformadas de 5 x 5 árboles con subparcelas de medición de 3 x 3 árboles. Dentro de las subparcelas de medición se calcularon los índices de área foliar con el instrumento LICOR 2200C con una periodicidad estacional, siendo necesario estimar modelos sinusoidales para obtener el índice de área foliar a nivel mensual. La evapotranspiración real se estimó a través de una ecuación modificada de Priestley Taylor, con principal factor diferenciador entre genotipos el índice de área foliar. Los resultados arrojaron que el genotipo ENG5 (*E. nitens x globulus*) fue el que mayor evapotranspiración logró con 1118 mm año<sup>-1</sup>, por contraparte, los genotipos EG8 (*E. globulus*) y EN15 (*E. nitens*) con 892 y 867 mm año<sup>-1</sup> respectivamente, donde fueron directamente relacionados con el índice de área foliar. Se evalúa la posibilidad de utilización comercial de genotipos con menor utilización hídrica como estrategia para combatir los sitios con escasez.

*Palabras claves:* Priestley-Taylor, evapotranspiración, índice de área foliar, genotipos, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus nitens x globulus*.

## II. ABSTRACT

Based on the global context of climate change and water deficit, there has been an increased interest in studying the water use of both agricultural and forestry crops. For the present study, was estimated the real evapotranspiration (modify Priestley-Taylor equation) for five genotypes of *Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus nitens* Deane & Maiden and *Eucalyptus nitens x globulus* species. The study was carried out 10 Km south from Yumbel town in the Biobío Region. The trial was located at “Carlos Douglas” forest nursery property of Forestal Mininco Co. The experimental design considered three blocks established as replicates, and plants were established at 3 x 2 m spacing. Plots consisted of 5 x 5 trees with measurement subplots of 3 x 3 trees. Within the measurement subplots, leaf area indexes were measured seasonally using a LICOR 2200C instrument and sinusoidal models were adjusted to estimate leaf area index for each month. Real evapotranspiration was estimated through a modified Priestley Taylor equation with the leaf area index as the main differentiating factor among genotypes. Results showed that genotype ENG5 (*E. nitens x globulus*) had the highest evapotranspiration with 1118 mm yr<sup>-1</sup>, while genotypes EG8 (*E. globulus*) and EN15 (*E. nitens*) had 892 and 867 mm yr<sup>-1</sup> respectively, which were directly related to its leaf area index display along the year. The chance of commercial use of genotypes with lower water use as a strategy to solve water shortages at sites prone to droughts is evaluated.

*Key words:* Priestley-Taylor, evapotranspiration, leaf index area, genotypes, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus nitens x globulus*.

### III. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global está trayendo consigo grandes repercusiones a nivel mundial. Se ha establecido que la temperatura promedio a nivel mundial aumentó 1,5°C (IPCC 2018), generando cambios ecosistémicos ya reportados en diferentes partes del mundo. Este aumento en la temperatura global estaría afectando directamente a los regímenes de precipitaciones, recursos renovables de agua superficial y agua freática (FAO 2017). Es importante indicar que cada grado de temperatura que aumente, un 7% de la población mundial estará expuesta a un 20% de la reducción de sus recursos hídricos renovables.

Al remontarnos en la historia de Chile, las precipitaciones durante las últimas décadas han ido en constante disminución. En la zona centro-sur del país (entre el Maule y Chiloé) se han registrado disminuciones que van desde los 100 mm por década (Garreaud 2011), influyendo netamente a aquellos cultivos o plantaciones agroforestales que dependen de la lluvia o precipitación incidente (Pi), la cual corresponde a la principal adición del agua para el aumento del contenido de humedad del suelo. Un caso claro de industrias que dependen de la Pi es la forestal. Las plantaciones forestales están clasificadas por tener una huella hídrica verde, haciendo referencia a que utiliza agua que es temporalmente almacenada en la superficie del suelo, pudiéndose evaporar, evapotranspirar o incorporar a la vegetación (Hoekstra 2008), es decir, que ocurre un ciclo dentro el ecosistema que depende de la Pi, denominado como balance hídrico (BH, Figura 1).

De esta manera, es importante estudiar el balance hídrico (BH) dentro de diferentes tipos de ecosistemas forestales, ya que al A partir de un análisis del balance hídrico dentro de una determinada superficie forestal podemos comprender como se está utilizando el agua, entendiendo que esta última es un bien vital para el funcionamiento de los bosques (Huber *et al.* 1998, Benyon *et al.* 2017) y la sociedad. El balance hídrico esta dado por diferentes factores que ocurren dentro de un ecosistema boscoso y dentro de los componentes se encuentra la intercepción del dosel (Ic), la cual corresponde a un fenómeno de gran importancia ya que se han descrito pérdidas de 18,7% a 31% para *Pinus radiata* y 10,6%

a 19% para *Eucalyptus spp* de la precipitación anual (Smith 1972, Benyon y Doody 2015). La  $I_c$  va a depender de cuanta sea la precipitación incidente, ya que mientras menor sea esta, más influyente será la intercepción (Huber y Oyarzún 1983). Su intensidad está determinada además por otros factores como la magnitud y la duración de la precipitación, además de la velocidad del viento (Huber y Oyarzun 1984, Zhang *et al.* 2022). Sumado al fenómeno de intercepción, cuando precipita de manera prolongada el follaje del árbol se satura y comienza a ocurrir otro componente del BH que corresponde al escurrimiento fustal (Pf). Este está definido como el agua que una vez captada por el árbol escurre por el tronco o fuste llegando al piso forestal (Mateos y Schnabel 1998). El Pf varía según las características de corteza que están dictadas por cada especie, por ejemplo su rugosidad y absorción, ya que para que el agua escurra la corteza debe estar saturada (Huber y Oyarzún 1983). El agua que logre escurrir será la que se podrá añadir a la precipitación neta que será la incorporada al suelo.

La evapotranspiración (EVP) corresponde a un tercer proceso dentro del BH y es el de principal magnitud (Arora 2002, Marini *et al.* 2017). La EVP es la suma de la transpiración de la planta (Tr) sumada a la evaporación del suelo (Es), la cual, al añadirse la intercepción ( $I_c$ ) sería lo que se conoce como evapotranspiración total (ET). La EVP está definida por diferentes componentes dentro del sistema, comprendiendo variables climáticas como la velocidad del viento, temperatura, radiación solar y la humedad relativa (HR) entre las más relevantes, donde además se consideran variables físicas del suelo y la vegetación (Pereira *et al.* 2015)



**Figura 1.** Variables asociadas a un balance hídrico.

Desde un punto de vista físico, el índice de área foliar (LAI) del bosque toma gran importancia a la hora de estudiar el [BH]. El LAI está altamente relacionado con la productividad de un determinado bosque, ya que a mayor LAI mayor es la superficie de fotosíntesis sujeta a la incidencia de luz (Navarrete *et al.* 2018), por ende también para mayores producciones o rendimientos se espera un mayor consumo de agua. Este índice, además, responde a variaciones de estrés o déficit hídrico atmosférico o causado por baja disponibilidad de agua en el suelo; de hecho, a medida que exista menor agua disponible en el sitio el índice de área foliar se verá reducido (Battaglia *et al.* 1998).

Dado el volumen del follaje de un bosque, una plantación forestal puede llegar a interceptar elevados porcentajes de precipitación dependiendo de su LAI, llegando a influir directamente en el ciclo del agua reteniéndola y en otras devolviéndola a la atmósfera ya sea por la transpiración o por la misma intercepción del dosel. Por lo general los principales problemas hídricos emergen cuando se reemplaza áreas de pastizales y/o

**Comentado [RR1]:** Debes usar siempre BH de un punto en adelante a menos que inicies el párrafo...ser consistente en el texto

**Comentado [RR2]:** Creo es navarrete

arbustos por bosques de alta cobertura disminuyendo el rendimiento hídrico del lugar. Sin embargo, depende del contexto climático y donde para climas húmedos, subhúmedos, semiáridos o áridos, son estos dos últimos los más afectados (Nosetto y Jobbágy 2014, Dresel *et al.* 2018)

Las plantaciones forestales han sido fuente de variados cuestionamientos sociales. Desde los comienzos del siglo pasado la industria forestal se ha ido incrementando a grandes pasos. La erosión y degradación de suelos generados por la intensa explotación agrícola han hecho que las plantaciones de bosques exóticos logren avanzar por su gran potencial de establecerse en estas zonas, y por consiguiente con el trascurso del tiempo hasta regenerar estos sitios, además al no encontrarse otra alternativa de obtener beneficios de estos suelos degradados han avanzado hacia zonas rurales, entregando además ayuda económica y desarrollo (INFOR y FIA 2013). Dentro de los principales cuestionamientos hacia la industria forestal se encuentra la supuesta culpabilidad del déficit hídrico en comunidades rurales. Al respecto se han realizado estudios sobre la veracidad de estos dichos comparando diferentes consumos hídricos entre bosques de *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata* y un bosque natural de *Nothofagus obliqua*, donde las plantaciones sobrepasaron por solo 100 mm anuales al bosque natural caduco, siendo estos reflejados solo en la transpiración de estas especies, ya que los demás componentes como evaporación del suelo e intercepción de dosel fueron similares (White *et al.* 2021).

Por su lado, el género *Eucalyptus* en Chile a nivel productivo forestal es de gran importancia llegando a tener rangos del 37,2 % de la superficie forestal (plantaciones forestales) (INFOR 2020). Se han realizado estudios sobre el posible efecto del cambio climático a futuro sobre las plantaciones forestales de eucalipto. Por ejemplo, en Brasil se proyectaron tres estratos temporales de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 donde se llegaron a reducciones de hasta el 40% de la producción (Baesso *et al.* 2010).

De esta manera, es de gran importancia estudiar el consumo de agua de las plantaciones forestales y evaluar soluciones para el desarrollo de una industria forestal más sostenible,

con el uso de los recursos naturales que entrega un sitio. En este sentido, surge la necesidad de innovar y mejorar, y por lo mismo, es que se plantea la problemática de determinar que tan eficiente es uso del agua por parte de las plantaciones forestales, considerando que nos encontramos ante un escenario de disminución en las precipitaciones y aumento en la temperatura que generan ecosistemas más secos y donde la influencia de un cultivo forestal puede ser fundamental (Huber y Trecaman 2004).

A partir de esta evidencia se generan preguntas de investigación tales como ¿Existe diferencia entre las tasas de evapotranspiración de distintos genotipos mejorados genéticamente en el área forestal? ¿Se pueden identificar genotipos específicos que tengan la posibilidad de obtener un menor requerimiento hídrico?

En este marco, y como objetivo principal de esta investigación se estableció comparar el uso del agua para genotipos de *E. globulus*, *E. nitens* y su híbrido correspondiente a *E. nitens x globulus*.

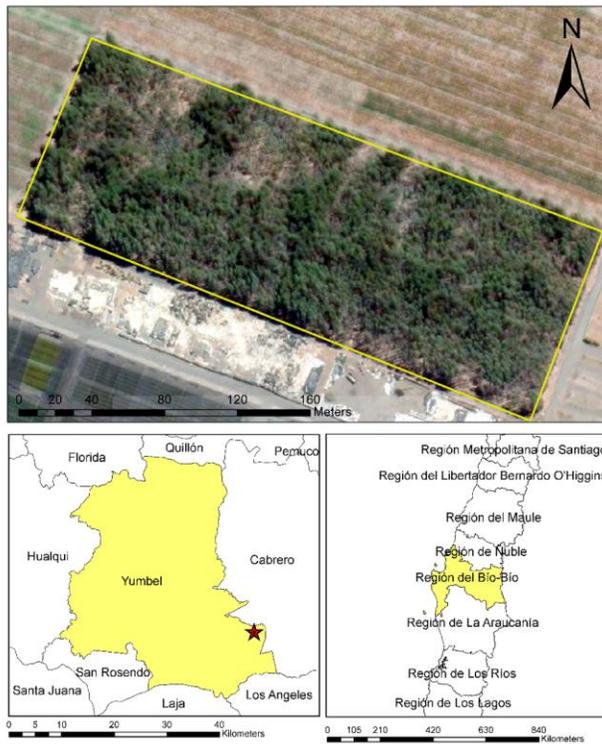
Los objetivos específicos establecidos fueron:

- Desarrollar modelos de índice de área foliar a nivel estacional y mensual para obtener estimaciones de evapotranspiración potencial de genotipos de *Eucalyptus*.
- Estimar el requerimiento hídrico modelado a través de la ecuación de evapotranspiración modificada de Priestley – Taylor.
- Comparar las tasas de evapotranspiración entre genotipos de *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* y su híbrido *E. globulus x nitens*.

## IV. METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción del área de estudio

El estudio base de este proyecto de investigación se localiza en la Comuna de Yumbel, Provincia del Biobío, Región del Biobío, ( $37^{\circ} 8' 0.01''$  S,  $72^{\circ} 27' 34.70''$  W) a una altitud de 120 m, en las instalaciones del vivero Carlos Douglas perteneciente a la empresa Forestal Mininco S.A.



**Figura 2.** Mapa de ubicación del área de estudio.

La zona presenta suelos Entisoles con una textura arenosa dominante en el perfil, lo que lleva a una baja capacidad de retención de agua por su alta presencia de macroporos (Zagal y Morales 2015).

## 2.2 Diseño experimental

Se consideraron 5 genotipos en el estudio, distribuidos para *Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus nitens* Deane & Maiden y *Eucalyptus nitens x globulus*. Estos se obtuvieron desde programas de mejoramiento genético de Forestal Mininco y Forestal ARAUCO, dividiéndose en 2 genotipos de *E. globulus* (EG8 y EG12), uno de *E. nitens* (EN15) y por último 2 de *E. nitens x globulus* (ENG1 y ENG5), donde cada genotipo contenía tres bloques que fueron considerados como repeticiones.

Las plantas se establecieron post preparación de suelo por medio de subsolado a 60 cm con mounding de 20 cm y a una separación de 3 x 2 m, donde las parcelas de experimentación consistían en 5 x 5 árboles con subparcelas de medición de 3 x 3 árboles.

Se realizó un control de maleza antes y después de plantación con glifosato (2,5 L ha<sup>-1</sup>) y cada planta fue fertilizada con 30 g de Basacote® Plus 12 M (COMPO EXPERT, Münster, Alemania) que contiene 15% de nitrógeno(N), 8% de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 12% de óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), 2% de óxido de magnesio (MgO) y 5% de azufre(S).

Comentado [RR3]: Favor corregir urgente, este es otro estudio que esta en la zona que evaluo Thiago, te confundiste

Comentado [RR4]: Esto último no cambio del ensayo principal

## 2.3 Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

Para la estimación del consumo de agua se consideró la ecuación de Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de Priestly-Taylor (1972). Esta ecuación requiere principalmente datos proporcionados por estaciones climáticas como lo son la humedad relativa (HR), velocidad del viento ( $u_2$ ), radiación neta (R<sub>n</sub>), temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y temperatura mínima ( $T_{min}$ ).

### 2.3.1 Ecuación Priestley-Taylor

$$ET_o = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G) \quad (1)$$

- Presión atmosférica ( $P_{atm}$ )

$$P_{atm} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,96} \quad (2)$$

Donde  $P_{atm}$  Corresponde a la presión atmosférica (kPa) y  $z$  es la elevación respecto al nivel del mar (m).

- Contante psicométrica

$$\gamma = 0,000665 * P_{atm} \quad (3)$$

Donde  $\gamma$  es la constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>) y  $P_{atm}$  la presión atmosférica (kPa).

- Velocidad viento a 2 m

$$u_2 = \frac{4,87 u_z}{\ln (67,8z - 4,52)} \quad (4)$$

Donde  $u_2$  es la velocidad del viento (m s<sup>-1</sup>),  $u_z$  velocidad del viento (ms<sup>-1</sup>) observada a una altura  $z$  (m).

- Presión de vapor saturado ( $e_s$ )

$$e_s = 0,611 \exp \left( \frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \quad (5)$$

Donde,  $e_s$  es la presión de vapor saturado (kPa) y  $T$  es la temperatura (°C)

- Presión de vapor saturado a temperatura máxima ( $e_{stmax}$ )

$$e_{stmax} = 0,611 \exp \left( \frac{17,27 T_{max}}{T_{max} + 237,3} \right) \quad (6)$$

En donde,  $e_{stmax}$  corresponde a la presión de vapor saturado a temperatura máxima (kPa) y  $T_{max}$  temperatura máxima registrada (°C)

- Presión de vapor saturado a temperatura mínima ( $e_{stmin}$ )

$$e_{stmin} = 0,611 \exp \left( \frac{17,27 T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right) \quad (7)$$

En donde,  $e_{stmin}$  corresponde a la presión de vapor saturado a temperatura mínima (kPa) y  $T_{min}$  temperatura mínima registrada (°C).

- Presión de vapor actual ( $e_a$ )

$$e_a = \frac{(e_{stmax} * 0,01HR_{min}) + (e_{stmin} * 0,01HR_{max})}{2} \quad (8)$$

Donde  $e_a$  es la presión de vapor actual (kPa),  $HR_{min}$  y  $HR_{max}$  corresponden la humedad relativa mínima y máxima de un día (%).

- Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 * \exp \left( \frac{17,27 * T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (9)$$

Donde  $\Delta$  corresponde la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>) y  $T_{med}$  es la temperatura media registrada en un día (°C).

Para la obtención de la evapotranspiración real se necesitan incorporar atributos propios del cultivo. En este caso se utilizó la ecuación modificada de Priestley-Taylor la que incorpora a la ecuación como variable determinante el índice de área foliar (LAI).

## 2.4 Estimación de área foliar (LAI)

La obtención del LAI *in-situ* fue realizada con el instrumento Li-Cor LI2200C. Dado que sólo se obtuvieron datos a nivel estacional (verano, primavera, otoño e invierno) se realizó una estimación a nivel mensual mediante el ajuste de 2 modelos de regresión no lineal sinusoidal (Ecuaciones 12 y 13). Cada genotipo, a nivel de bloque, fue modelado por medio de la ecuación de mejor ajuste para la estimación de evapotranspiración real de la forma:

$$IAF = b_0 + b_1 \operatorname{sen}(2 * \pi * MES * b_2) \quad (12)$$

$$IAF = b_0 + b_1 \operatorname{cos}(2 * \pi * MES * b_2) \quad (13)$$

Donde, IAF es el índice de área foliar, b1 y b2 son coeficientes de regresión y donde b0 corresponde al intercepto del modelo.

## 2.5 Evapotranspiración real (ETr)

Para la obtención de la evapotranspiración real (ETr) es crucial contar con los valores de LAI al menos a nivel mensual. Por esta razón se realizó el ajuste a nivel mensual considerando la estimación de la ETr mediante la ecuación de modificada de Priestley-Taylor. La ecuación se ajustó considerando los datos meteorológicos que utiliza la evapotranspiración de referencia (ETo), además de un ajuste asociado al índice de área foliar (LAI) que se presenta en la ecuación 14.

$$ETr = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn [\alpha_c - \alpha_c \exp(-kLAI) + \alpha_s(1 - c) * \exp(-kLAI)] \quad (14)$$

Donde  $\alpha_c$  es el coeficiente de evaporación del suelo y  $\alpha_s$  la transpiración de la cobertura vegetal, k es el coeficiente de extinción que para este caso se utilizará 0,5.

**Comentado [RR5]:** Es importante establecer los valores de los coeficientes en anexos en una tabla

$$\alpha_s = \alpha - \frac{(\alpha - 1)(\alpha - \tau)}{(1 - \tau_0)} \quad (15)$$

$$\alpha_c = \frac{(\alpha - \alpha_s \tau)}{(1 - \tau)} \quad (16)$$

Donde  $\alpha$  corresponde al coeficiente de Priestley-Taylor (1,26)(Priestsley y Taylor 1972),  $\tau$  es la fracción de transmisión de radiación que llega a la superficie del suelo ( $\tau = \exp(-kLAI)$ ),  $\tau_0$  es el valor crítico de  $\tau$  cuando la cobertura de dosel llega a su máximo (0,55) (Morgan *et al.* 2003).

## 2.5 Análisis estadístico

Realizadas las estimaciones, tanto a nivel mensual como estacional, se realizaron pruebas estadísticas para evidenciar diferencias entre genotipos establecidos considerando dichas diferencias a nivel de medias a un nivel de significancia para las pruebas estadísticas de  $p=0,05$ . De esta manera, se comparó la evapotranspiración de los genotipos estudiados para todas las estimaciones que se indican a continuación:

- Evapotranspiración real (ETr) acumulada anual.
- Mes con mayor ETr por genotipo.
- Mes con menor ETr por genotipos.
- Diferencias de ETr estacionales (acumulados y medias diarias).

Las pruebas estadísticas realizadas consideraron análisis de varianza (ANOVA), lo cual permitió evidenciar diferencias significativas entre genotipos, donde se establecieron las siguientes pruebas de hipótesis:

$H_0$  = Las medias de los genotipos son iguales.

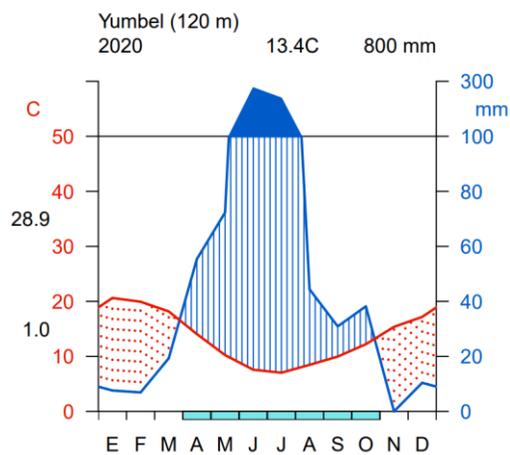
$H_1$  = Al menos una de las medias es distinta.

Para establecer los genotipos que presentaron diferencias con sus pares se realizaron test de Tukey. Los análisis estadísticos fueron realizados a través del software estadístico R (R Studio versión 4.1.1).

Comentado [RR6]: No se mencionó nunca el programa realizado en R para los cálculos realizados

## V. RESULTADOS

El análisis preliminar de la variación climática para el año 2020 del área de estudio (estación meteorológica de Yumbel, INIA) se presenta por medio de un diagrama ombrotérmico donde se observan (figura 3) estaciones bien marcadas con un período estival que comprende los meses de noviembre a febrero, siendo evidente el aumento de la temperatura con un máximo en el mes de enero.

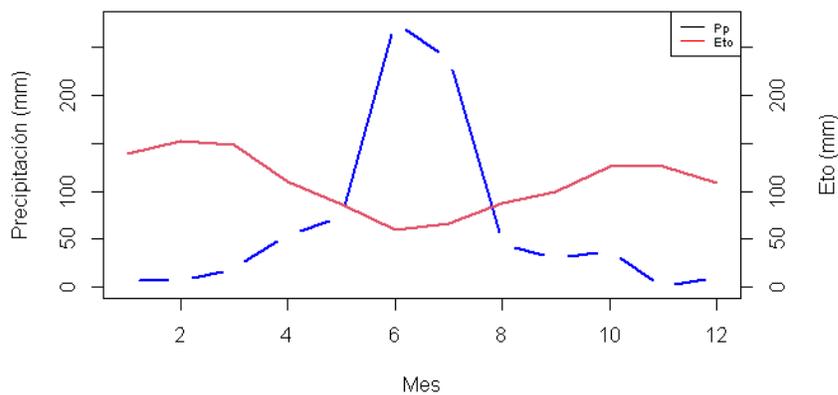


**Figura 3.** Diagrama ombrotérmico que ilustra el comportamiento de la precipitación y temperatura a nivel mensual para el área de estudio en el año 2020.

En cuanto a las precipitaciones, durante el año 2020, se registraron 135 días de lluvia, no obstante, de este total, 72 días fueron los que sumaron más de 1 mm de agua para acumular un total anual de 800 mm. El análisis realizado indica que junio es el mes más húmedo, mientras noviembre seguido de febrero corresponden a los meses más secos.

### 3.1 Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

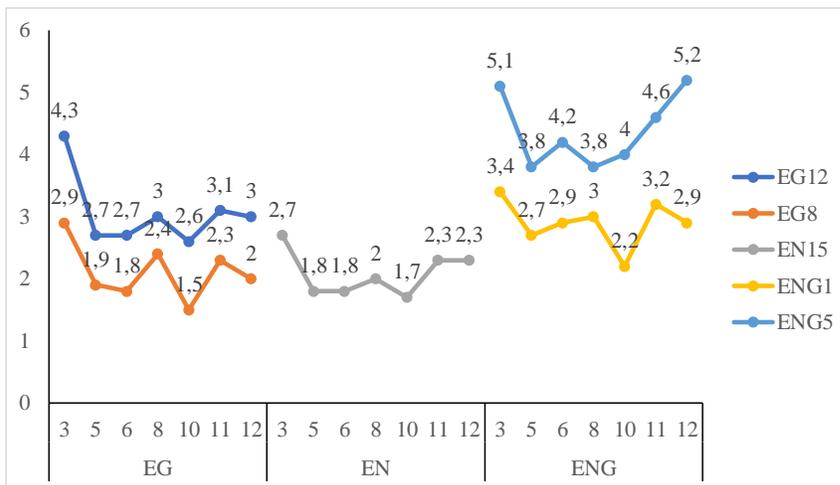
Con los datos colectados de la estación meteorológica del lugar se logró calcular la evapotranspiración de referencia (Priestley-Taylor) para el año de estudio. La estimación anual de esta variable acumulo un total de 1312 mm, y dónde su máximo fue durante el mes de marzo con 152 mm. Contrastantemente, el mínimo fue observado en el mes de junio durante la temporada de invierno siendo además el mes con mayor precipitación (Figura 4).



**Figura 4.** Gráfico de distribución de precipitaciones (Pp) en al año 2020 versus la distribución mensual de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para el mismo año.

### 3.2 Estimación de índice de área foliar (LAI)

Las mediciones de índice de área foliar (LAI) mostraron sus valores más altos en los meses de primavera – verano. Al evaluar los genotipos individuales, el genotipo 5 del híbrido *E. nitens x globulus* fue el que logró un LAI con valores promedio de los 3 bloques más altos, presentando un LAI máximo de  $5,15 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$  en el mes de diciembre (Figura 5) seguido por el genotipo EG12 de *E. globulus* con un LAI de  $4,33 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ . En cuanto a los valores más bajos observados estos fueron presentados por los genotipos EG8 y EN15 de *E. globulus* y *E. nitens* con valores máximos de LAI de 2,89 y 2,67 respectivamente.



**Figura 5.** Gráfico de resultados de medición de índice de área foliar (LAI) para todos los genotipos por mes considerados el año de estudio.

A partir de la información observada, y en concordancia con el primer objetivo específico, se plantearon 2 modelos sinusoidales con el fin de estimar los niveles de LAI a nivel mensual. El ajuste se realizó a nivel de parcela para cada réplica de cada genotipo (bloques). De esta manera, se buscó el mejor ajuste considerando el error estándar residual de cada regresión (RSE). Finalmente, dado el patrón de despliegue de área foliar

**Comentado [RR7]:** Pancho los genotipos deberían venir identificados en el gráfico por sus códigos no solo el nro

estacional, sólo el genotipo EG8 se ajustó al modelo 2 (ecuación 13) y todos los otros genotipos al modelo 1 (Ecuación 13, Tabla 1).

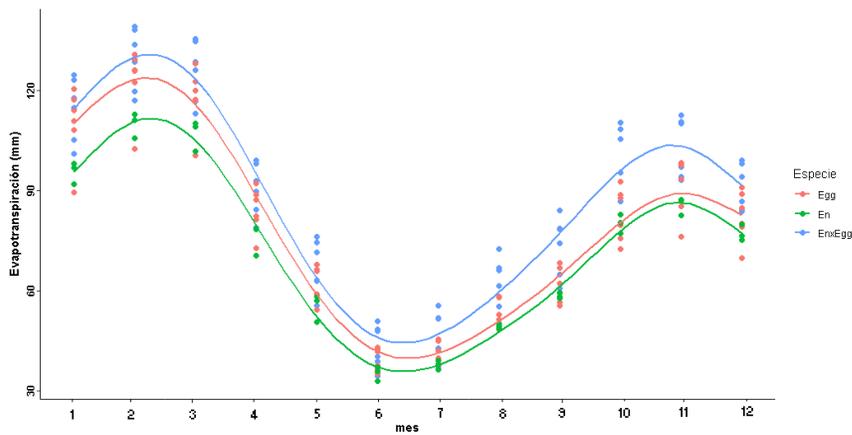
**Tabla 1.** Modelos finales seleccionados para estimación del índice de área foliar (LAI).

Genotipo	Bloque	Modelo	Parámetros			RSE
			b0	b1	b2	
ENG1	1	1	0,622	0,303	1,244	0,181
	2	1	0,757	0,130	0,973	0,086
	3	1	0,744	0,203	1,141	0,075
ENG5	1	1	0,596	0,240	1,351	0,113
	2	1	0,714	0,184	1,145	0,097
	3	1	0,777	0,125	1,162	0,087
EG8	1	2	0,737	0,436	0,733	0,145
	2	2	0,814	0,389	0,744	0,136
	3	2	0,701	0,250	1,076	0,078
EG12	1	1	0,706	0,169	1,084	0,168
	2	1	0,619	0,281	1,113	0,104
	3	1	0,717	0,198	1,144	0,088
EN15	1	1	0,560	0,251	1,306	0,208
	2	1	0,711	0,286	1,165	0,075
	3	1	0,683	0,244	1,098	0,118

Dónde Modelo 1 corresponde a  $IAF = b_0 + b_1 \sin(2 * \pi * MES * b_2)$  y Modelo 2 corresponde a  $AF = b_0 + b_1 \cos(2 * \pi * MES * b_2)$

### 3.3 Evapotranspiración real (ETr)

A partir de las estimaciones del LAI se realizó el cálculo de evapotranspiración real para cada genotipo a nivel de parcela para cada bloque. Los resultados de las estimaciones realizadas sugieren, en una primera instancia, una tendencia a que los genotipos asociados al híbrido (ENG1 y ENG5) presentan mayores tasas de evapotranspiración (Figura 6), seguidos por los genotipos de *E. globulus* (EG8 y EG11) y finalmente por el genotipo de *E. nitens* (EN15).



**Figura 6.** Gráfico con evapotranspiraciones reales (ETr) mensuales estimadas para de cada genotipo y curvas promedio ajustadas a nivel de especie.

**Comentado [SPYF8]:** Pienso que el eje X debes ajustarlo a valores enteros correspondientes a cada mes !

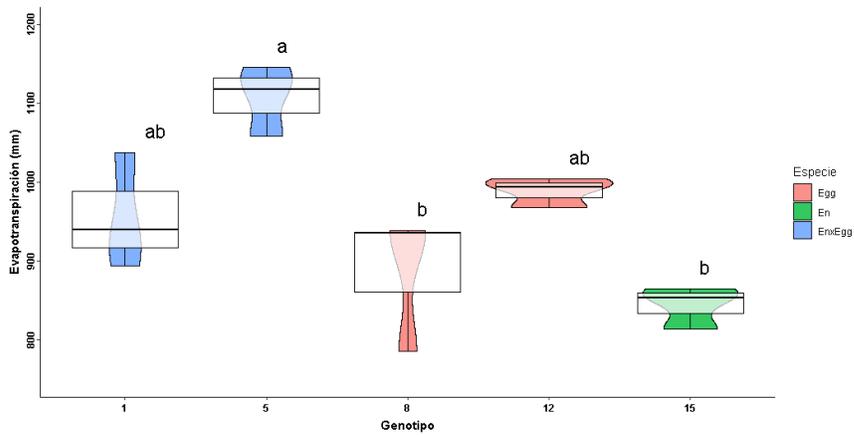
### 3.4 Análisis estadístico

En base a los análisis estadísticos realizados se efectuaron comparaciones entre las tasas de evapotranspiración para los genotipos estudiados. Los resultados de estos análisis se presentan a continuación para cada parámetro evaluado.

#### 3.4.1 Evapotranspiración real (ETr) acumulada anual

En primera instancia se realizó un análisis para evapotranspiraciones acumuladas anuales asociadas al año de estudio, arrojando que, existen diferencias significativas entre genotipos (Tabla 2). El gráfico de la figura 7 muestra como el genotipo ENG5 alcanzó un valor de ETr de 1118 mm para el año 2020 dado su mayor nivel de LAI y superando a todos los demás materiales evaluados. Contrastantemente, los genotipos EG8 y EN15 presentaron tasas de ETr de 892 mm y 867 mm respectivamente, y son los que presentan los menores niveles de LAI.

**Comentado [RR9]:** Tablas y figuras indicar en mayúsculas, ojo no son diferencias entre varianzas! Revisa esto



**Figura 7.** Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) anual acumulada para el año de estudio. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

**Comentado [RR10]:** Este texto deberían llevar las figuras que siguen, ya que los textos no son los adecuados

**Tabla 2.** Análisis de varianza (ANOVA) para las evapotranspiraciones reales (ETr) acumuladas anuales.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Genotipo	4	117902	29476	11,76	0,00085*
Residuals	10	25073	2507		

El test de Tukey evidenció diferencias significativas entre las medias para cinco genotipos ( $p > 0,05$ ). La mayor diferencia fue encontrada entre los genotipos ENG5 y EN15 con una diferencia de 250 mm (Tabla 3), siendo los de mayor y menor tasa de evapotranspiración, respectivamente.

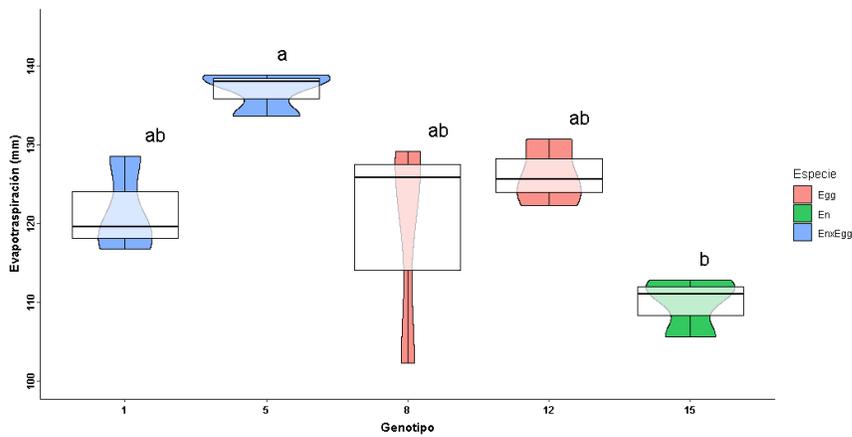
**Tabla 3.** Tabla de resultados de test de Tukey para la evapotranspiración real (ETr) acumulada anual entre los genotipos estudiados.

Genotipo	diff	p adj
ENG5-ENG1	143,820	0,034*
EG8-ENG1	-81,740	0,341
EG12-ENG1	41,130	0,823
ENG15-ENG1	-106,462	0,146
EG8-ENG5	-225,559	0,001*
EG12-ENG5	-102,689	0,129
EN15-ENG5	-250,282	0,001*
EG12-EG8	122,870	0,056
EN15-EG8	-24,722	0,973
EN15-EG12	-147,592	0,019*

Comentado [RR11]: Aquí solo se ven 4 acorde al p value

### 3.4.2 Evapotranspiración real (ETr) mensual mayor

Se realizó un ANOVA para el mes del año con máxima evapotranspiración para cada genotipo evaluado el cual correspondió al mes de febrero, siendo este el segundo mes con mayor temperatura, y coincidente con el mes en que la gran mayoría de los genotipos alcanzan su máximo índice de área foliar. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que existieron diferencias estadísticas ente genotipos (Tabla 4). En este caso, y congruente con el análisis a nivel anual, el genotipo ENG5 fue el que presentó una mayor ETr (138 mm) en su mes con mayor tasa evapotranspirativa. Contrastantemente, el genotipo EN15 presenta su menor evapotranspiración (111 mm) en su mes con mayor uso de agua (Figura 8).



**Figura 8.** Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) máxima mensual según cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

**Tabla 4.** Análisis estadístico de diferencia de varianzas (ANOVA) para la evapotranspiración real (Etr) mínima a nivel mensual.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Genotipo	4	1176,85	294,214	5,0346	0,01746*
Residuals	10	584,38	58,438		

En cuanto al test de diferencias de medias de Tukey, solo se evidenció una diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) entre los genotipos ENG5 y EN15 distanciados entre sí por sólo 27,03 mm. Todos los demás genotipos se encuentran dentro de una misma media con diferencias menores no significativas (Tabla 5)

**Tabla 5.** Tabla de resultados del test de Tukey para la evapotranspiración máxima mensual entre los genotipos estudiados. Se presenta ejemplos de las comparaciones y la media resultante significativa.

Genotipo	diff	p adj
ENG5-ENG1	15,235	0,181

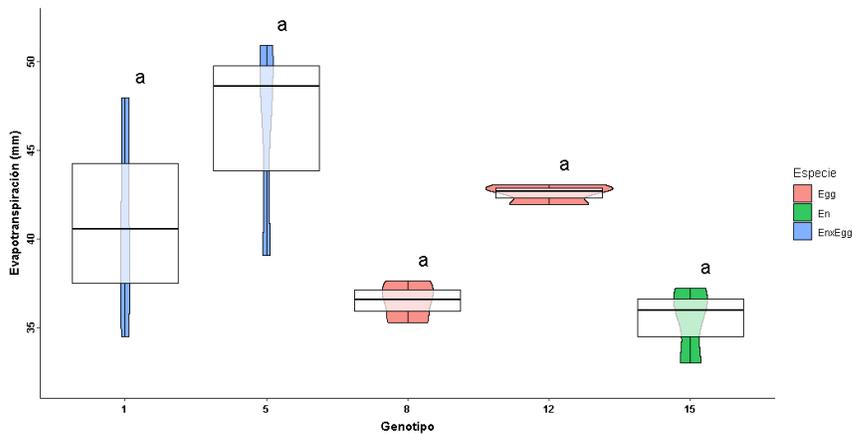
**Comentado [RR12]:** Este texto deberían llevar las figuras que siguen, ya que los textos no son los adecuados

**Comentado [RR13]:** Cambiar título acorde al anterior y todos los demás

EG8-ENG1	-2,483	0,994
EG12-ENG1	4,600	0,943
EN15-ENG1	-11,791	0,381
EG8-ENG5	-17,718	0,100
EG12-ENG5	-10,635	0,473
EN15-ENG5	-27,026	0,010*
EG12-EG8	7,083	0,786
EN15-EG8	-9,308	0,590
EN15-EG12	-16,391	0,138

### 3.4.3 Evapotranspiración real (Etr) mensual menor

Las evapotranspiraciones mínimas para la totalidad de los genotipos ocurrieron en el mes de junio, coincidente con el mes con mayor precipitación y el segundo mes con menor temperatura. Se logran apreciar tendencias para el genotipo ENG5 (*E. nitens x globulus*) que, consistentemente, se encuentra por encima de los demás en su tasa de ETr; por el contrario, el genotipo EN15 (*E. nitens*) presentó el menor consumo hídrico (Figura 9). No obstante existen estas tendencias, no se pueden considerar diferencias significativas acorde a los ANOVA realizados (Tabla 6).



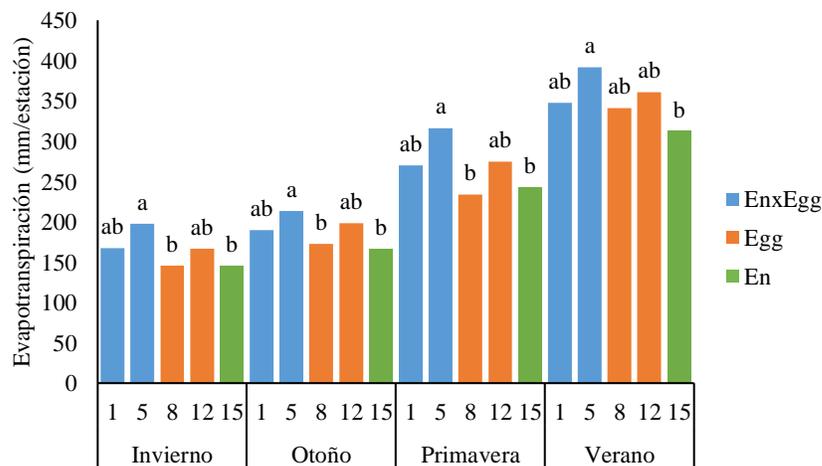
**Figura 9.** Diagrama de cajas para la evapotranspiración real (ETr) mínima mensual según cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

**Tabla 6.** Análisis estadístico de diferencia de varianzas (ANOVA) para la evapotranspiración real (Etr) menor a nivel mensual

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Genotipo	4,000	236,390	59,098	32,193	0,061
Residuals	10,000	183,570	18,357		

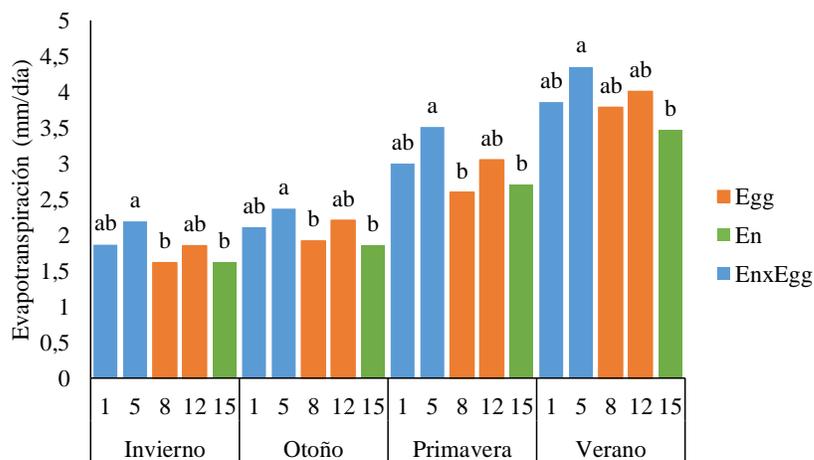
#### 3.4.4 Evapotranspiración real (ETr) estacional.

A nivel estacional de ETr, los resultados de los análisis realizados indicaron que en primavera y verano se concentra el 64% de la evapotranspiración anual. La totalidad de los genotipos logran su máxima tasa en verano seguido de primavera, y para las cuales una diferencia significativa se presenta para el genotipo ENG5 respecto a otros materiales. Una situación diferente se presenta para el genotipo EN15, el cual presenta la menor tasa de evapotranspiración en todas las estaciones.



**Figura 10.** Gráfico de evapotranspiración real (ETr) acumulada por estación del año para cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

Los valores de evapotranspiración diaria se diferenciaron significativamente al igual que en los valores acumulados estacionales. Los genotipos ENG5 y EG12 lograron las evapotranspiraciones medias diarias más altas para la totalidad de las estaciones, encontrando su máximo en verano con 4,4 y 4,0 mm día<sup>-1</sup>, respectivamente. En cuanto al genotipo con menor requerimiento hídrico, se obtuvo que el genotipo de *E. nitens* (EN15), presentando su menor evapotranspiración media diaria en invierno con 1,6 mm día<sup>-1</sup> y su máxima en verano con 3,5 mm día<sup>-1</sup> (Figura 11).

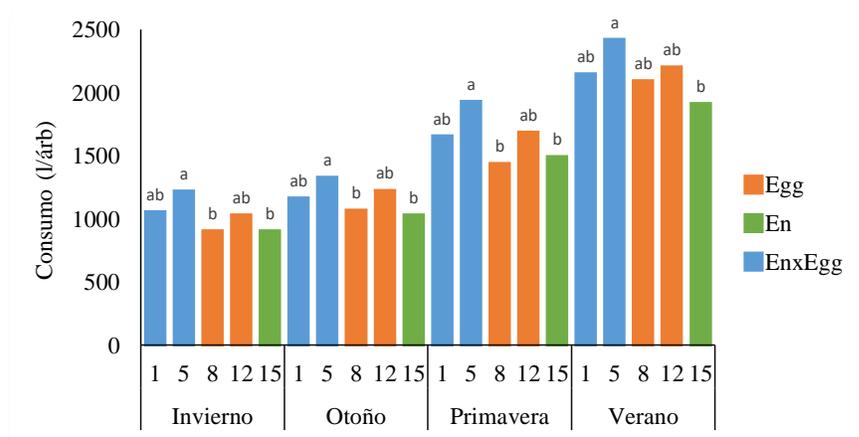


**Figura 11.** Gráfico de evapotranspiración real (ETr) media diaria por estación del año para cada genotipo. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

A la hora de realizar un análisis de consumo hídrico a nivel de árbol, nos encontramos que a nivel estacional el genotipo ENG5 es el que acumula más litros de consumo agua a lo

**Comentado [RR14]:** Este texto deberían llevar las figuras que siguen, ya que los textos no son los adecuados

largo de las 4 estaciones con un máximo de 2402 l arb<sup>-1</sup> en verano (Figura 12), obteniendo un promedio diario de 26,4 l día<sup>-1</sup> por árbol. Al expandir estas estimaciones a nivel de hectárea, considerando el espaciamiento descrito en la metodología, se obtiene que el rodal de este genotipo consume un total anual de 4004000 l ha<sup>-1</sup>. Por su parte el genotipo EN15 es el que menos consumo hídrico a nivel de litros tiene con un máximo de 1894,62 l arb<sup>-1</sup> con un promedio diario de 20,82 día<sup>-1</sup> y un consumo en a nivel de bosque anual de 3157700 l ha<sup>-1</sup>.



**Figura 12.** Gráfico de consumo hídrico en l arb<sup>-1</sup> acumulado por genotipo y estación. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre medias de genotipos.

**Comentado [RR15]:** Este texto deberían llevar las figuras que siguen, ya que los textos no son los adecuados

## VI. DISCUSIÓN

Ante la disminución constante de las precipitaciones, producto del cambio climático proyectado para Chile y otros países de latinoamerica, es que se ha tomado como tema de gran importancia investigar cuanto es la eficiencia y consumo hídrico de los cultivos agrícolas y forestales. Entre los cultivos que más polémica han causado en cuanto a su consumo hídrico se encuentran las plantaciones forestales de *Pinus radiata*, *Eucalyptus spp.* y por parte de la industria agrícola las plantaciones de paltos, olivos entre otros. El impacto proyectado del cambio climático para plantaciones de eucaliptos en Sudamérica puede ser tan drástico como para hacer que estas sean inviables económicamente. Estudios del efecto del incremento medio de las temperaturas de 1,5 °C y 2°C, y su impacto sobre las plantaciones de Eucalipto sugieren que para el 49,2% a 56,7% de sudamerica será inviable una plantación de esta especie, a excepción de zonas del sur de Chile y Argentina cercanas a cordillera de los Andes (Martins *et al.* 2022).

Estudios previos sobre el efecto de condiciones hídricas limitantes en el crecimiento y evapotranspiración en plantaciones de Eucalipto de distintas especies han sido evaluados previamente Honeysett *et al.* (1992). En estos estudios se ha reportado que existen reducciones de productividad importante entre especies, siendo *E. nitens* la especie menos afectada por su menor requerimiento hídrico. En nuestro estudio se evidenciaron diferencias significativas entre genotipos, es decir, se valida la hipótesis de la existencia de diferencias significativas de genotipos y de manera similar se evidenció la posibilidad de encontrar diferencias importantes para selección entre genotipos intraespecíficos, en particular los resultados alcanzados para el híbrido *E. nitens x globulus* con un delta de 143,8 mm ha-1.

Frente a esta problemática se plantea como se pueden modificar las actividades silvícolas para un aprovechamiento sustentable del recurso forestal. Se han realizado estudios que buscan explicar el efecto de la densidad de plantación sobre el consumo hídrico. Huber *et al.* 1998 y Zhang *et al.* 2001 sugieren que el fenómeno de intercepción de dosel es

determinante. Huber y Iroumé (2006), Huber *et al.* (2010) y (Reichert *et al.* 2021) recomiendan raleos o plantaciones a densidades menores para así tener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Otra estrategia que está relacionada con el presente estudio es el seleccionar o buscar genotipos intraespecíficos que tengan un menor requerimiento hídrico y que las limitaciones de disponibilidad hídrica afecten lo menor posible su productividad.

Se han realizado estimaciones de evapotranspiración para *E. globulus* con rangos de 829 a 1318 mm ha<sup>-1</sup>, donde en la temporada de máximo crecimiento (primavera-verano), se reportaron valores desde 3,6 a 3,9 mm día<sup>-1</sup>, en contraste con rangos descritos para la otoño-invierno de 1,5 a 1,7 mm día<sup>-1</sup> (Oyarzún y Huber 1999, Martínez y Silveira 2013, White *et al.* 2021, Smethurst *et al.* 2022). Al comparar los rangos reportados con nuestro estudio se logran apreciar similitudes principalmente para el genotipo EG8 con 3,7 mm día<sup>-1</sup> en verano y con 1,6 mm día<sup>-1</sup> en invierno, y en menor medida el genotipo EG12 que se encuentra cercano a los rangos reportados con resultados de la temporada estival de 4,0 mm día<sup>-1</sup>.

Para *Eucalyptus nitens* se han reportado valores de 791 y 1052 mm año<sup>-1</sup> acumulados a los 6 y 9 años de edad respectivamente (Roberts *et al.* 2015). Otro estudio reporta para la temporada de máximo crecimiento (24 semanas) rangos 369 a 584 mm ha<sup>-1</sup> (Honeysett *et al.* 1992). Al realizar una comparación con el presente estudio y la literatura anteriormente indicada, se obtiene que las estimaciones a nivel de acumulado anual para *E. nitens* (867 mm año<sup>-1</sup>) se encuentran dentro de lo descrito por otros autores, así como también para la temporada de máximo crecimiento con 555 mm ha<sup>-1</sup>.

Comparaciones de consumo hídrico con cultivos agrícolas muestran ciertas similitudes con los resultados de este estudio. Por ejemplo, el avellano europeo (*Corylus avellana*), ha sido últimamente un cultivo que está logrando una gran expansión en Chile y para el cual se han reportado rangos de evapotranspiración de 564 a 759 mm ha<sup>-1</sup> (Ellena *et al.* 2018), valores que se encuentran por debajo de los resultados del presente estudio para

**Comentado [RR16]:** Esto esta desordenando y poco claro, trate de ayudarlo pero aun así queda un vacío de redacción. Hay que explicar de manera completa y debe leer el texto bien para darse cuenta de como queda.

todas las especies y genotipos evaluados. No obstante, es de importancia considerar que esta especie es caducifolia, es decir, no presenta evapotranspiración en temporadas de otoño-invierno, por lo tanto, concentran su utilización de agua en temporadas de primavera y verano con rangos de 2,4 a 2,7 mm día<sup>-1</sup> y 3,3 a 3,9 mm día<sup>-1</sup> respectivamente. Interesantemente, los valores para estas temporadas se hallan dentro de lo descrito para las especies y genotipos del presente estudio.

Estudios en palto, un cultivo que también ha sido sometido a cuestionamientos sobre el uso de agua, sitúa su consumo en rangos anuales de 639 a 735 mm ha<sup>-1</sup> (Kaneko *et al.* 2022), valores que están por debajo de los resultados del genotipo con menor evapotranspiración (genotipo 15) observado en este estudio. Sin embargo, también se reportan valores máximos de 3 a 5 mm día<sup>-1</sup> (Carr 2013) que corresponden a tasas por encima de los máximos estimados para los materiales genéticos evaluados en este estudio.

Otras estimaciones realizadas de consumo hídrico para diferentes cultivos agrícolas en tres ubicaciones de cuenca (alta, media y baja), han reportado rangos para cultivos de durazno de entre 850 y 900 mm ha<sup>-1</sup>, manzana 850 y 900 mm ha<sup>-1</sup>, cítricos entre 600 y 750 mm ha<sup>-1</sup> y paltos entre 750 y 800 mm ha<sup>-1</sup> (Novoa *et al.* 2019), tasas similares a las observadas para las especies y genotipos estudiados. Sin embargo, los cultivos evaluados cuentan con sistemas de riego que inclusive duplican el consumo.

**Comentado [RR17]:** Cada consumo anual indicado debería decir mm ha<sup>-1</sup>, expresarlo en ha. Lo otro es que los estudios de Chile no indican en que zona se reportan esos consumos por si coinciden con la demanda atmosférica, o al menos deberías mencionarlo

## VII. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian que existen diferencias significativas de tasas de evapotranspiración entre genotipos de eucaliptos. El genotipo de *E. nitens* fue el que presentó un menor requerimiento hídrico (867 mm ha<sup>-1</sup>), seguido del genotipo EG8 de *E. globulus* (885 mm ha<sup>-1</sup>). Por el contrario, el genotipo ENG5, del híbrido *E. nitens x globulus*, fue quien presentó la mayor tasa de evapotranspiración con 1118 mm ha<sup>-1</sup>.

El factor determinante para evidenciar diferencias entre genotipos fue el índice de área foliar (LAI), donde los genotipos que presentaron mayor LAI estacional presentaron a su vez mayores tasas evapotransporativas y viceversa.

Al comparar el consumo hídrico estimado para las especies y genotipos estudiados en el presente estudio con cultivos agrícolas se encontraron claras similitudes, donde cultivos como el de avellano europeo y cítricos se sitúan levemente con menor evapotranspiración al genotipo con menor requerimiento hídrico. Por contraparte, otros cultivos como de durazno y manzana, si bien superan levemente el uso de agua de los materiales estudiados, su cultivo a través de irrigación duplica su consumo efectivo por la baja eficiencia de los sistemas de regadío que no es considerada.

En base a los resultados del presente estudio se puede plantear viable la estrategia de utilización de genotipos con menor requerimiento hídrico en zonas con escasez, no obstante, debe ser validado con evaluaciones de rendimiento para lograr encontrar el equilibrio entre productividad y sostenibilidad hídrica.

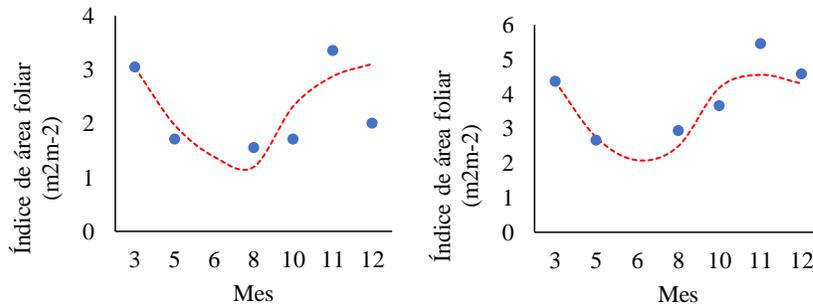
## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Arora V.K. 2002. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology* 265(1-4): 164-177.
2. Baesso R.C.E., A. Ribeiro, M.P. Silva. 2010. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. *Ciência Florestal* 20(2): 335-344.
3. Battaglia M., M.L. Cherry, C.L. Beadle, P.J. Sands, A. Hingston. 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiol* 18(8-9): 521-528.
4. Benyon R.G., T.M. Doody. 2015. Comparison of interception, forest floor evaporation and transpiration in *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydrological Processes* 29(6): 1173-1187.
5. Benyon R.G., R.H. Nolan, S.N.D. Hawthorn, P.N.J. Lane. 2017. Stand-level variation in evapotranspiration in non-water-limited eucalypt forests. *Journal of Hydrology* 551: 233-244.
6. Carr M.K.V. 2013. The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea americana* Mill.): A review. *Experimental Agriculture* 49(2): 256-278.
7. Dresel P.E., J.F. Dean, F. Perveen, J.A. Webb, P. Hekmeijer, S.M. Adelana, *et al.* 2018. Effect of *Eucalyptus* plantations, geology, and precipitation variability on water resources in upland intermittent catchments. *Journal of Hydrology* 564: 723-739.
8. Ellena M.D., P.F. Sandoval, A.G. González, A.B. Montenegro, G.B. Azócar, L. Medina, eds. 2018. Avellano europeo: Establecimiento y formación de la estructura productiva. Temuco:INIA.
9. FAO. 2017. La estrategia de la fao sobre el cambio climático. FAO. Roma. 49 p.
10. Garreaud R.D. 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Tierra Adentro 93.
11. Hoekstra A.Y. 2008. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints. Netherlands:UNESCO-IHE
12. Honeysett J.L., C.L. Beadle, C.R.A. Turnbull. 1992. Evapotranspiration and growth of two contrasting species of eucalypts under non-limiting and limiting water availability. *Forest Ecology and Management* 50(3-4): 203-216.
13. Huber A., P. Barriga, R. Trecaman. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hidrico en la zona de Collipulli, IX Region (Chile). *BOSQUE* 19(1): 61-69.
14. Huber A., A. Iroumé. 2006. Efecto de las plantaciones de *Pinus radiata* sobre el recurso agua en Chile IAHS.
15. Huber A., A. Iroumé, C. Mohr, C. Frêne. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *BOSQUE* 31(3): 219-230.
16. Huber A., C. Oyarzun 1984. Factores reguladores de la intercepcion en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. DON.). *BOSQUE* 5(2): 59-64.

17. Huber A., C. Oyarzún. 1983. Precipitación neta e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. DON). BOSQUE 5(1): 13-20.
18. Huber A., R. Trecaman. 2004. Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. BOSQUE 25(3): 33-43.
19. INFOR. 2020. Anuario forestal 2020. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 256 p.
20. INFOR, FIA. 2013. Estado del arte : las plantaciones forestales y el agua. INFOR. 122 p.
21. IPCC. 2018. Global Warming of 1.5 °C. pp. 49-91.
22. Kaneko T., N. Gould, D. Campbell, P. Snelgar, M.J. Clearwater. 2022. The effect of soil type, fruit load and shaded area on 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) water use and crop coefficients. Agricultural Water Management 264.
23. Marini F., M. Santamaría, P. Oricchio, C.M. Di Bella, A. Basualdo. 2017. Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. Revista de Teledetección(48).
24. Martínez L., L. Silveira. 2013. Estimación del consumo de agua en una plantación adulta de *Eucalyptus* Universidad de la República.
25. Martins F.B., R.B. Benassi, R.R. Torres, F.A. de Brito Neto. 2022. Impacts of 1.5 degrees C and 2 degrees C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. Sci Total Environ 825: 153820.
26. Mateos A., S. Schnabel. 1998. Medición de la interceptación de las precipitaciones por la encina (*quercus rotundifolia* lam.): Metodología e instrumentalización. 10: 95-112.
27. Morgan C.L.S., J.M. Norman, B. Lowery. 2003. Estimating Plant-Available Water Across a Field with an Inverse Yield Model. Soil Science Society of America Journal 67(2).
28. Nafarrete A., J. Dupuy, S. George, J. Hernández. 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): 1-17.
29. Noretto M., E. Jobbágy. 2014. Plantaciones forestales: Sus servicios e impactos hidrológicos. Producción Forestal 8: 18-20.
30. Novoa V., R. Ahumada-Rudolph, O. Rojas, K. Saez, F. de la Barrera, J.L. Arumi. 2019. Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile. Sci Total Environ 670: 188-199.
31. Oyarzún C., A. Huber. 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. Terra 17(1): 35-44.
32. Pereira L.S., R.G. Allen, M. Smith, D. Raes. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Agricultural Water Management 147: 4-20.
33. Prietsley C.H.B., R.J. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review 100(2): 81-91.
34. Reichert J.M., J. Prevedello, P.I. Gubiani, E.S. Vogelmann, D.J. Reinert, C.O.B. Consensa, et al. 2021. *Eucalyptus* tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. Forest Ecology and Management 497.

35. Roberts S., R. Barton-Johnson, M. McLarin, S. Read. 2015. Predicting the water use of *Eucalyptus nitens* plantation sites in Tasmania from inventory data, and incorporation of water use into a forest estate model. *Forest Ecology and Management* 343: 110-122.
36. Smethurst P.J., T.R. McVicar, N.I. Huth, B.P. Bradshaw, S.B. Stewart, T.G. Baker, *et al.* 2022. Nitrate Uptake from an Aquifer by Two Plantation Forests: Plausibility Strengthened by Process-Based Modelling. *Forests* 13(2).
37. Smith M.K. 1972. Throughfall Stemflow and Interception in Pine and Eucalypt Forest. *Australian Forestry* 36(3): 190-197.
38. White D.A., R.P. Silberstein, F. Balocchi-Contreras, J.J. Quiroga, D.F. Meason, J.H.N. Palma, *et al.* 2021. Growth, water use, and water use efficiency of *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata* plantations compared with natural stands of Roble-Hualo forest in the coastal mountains of central Chile. *Forest Ecology and Management* 501.
39. Zagal E., P. Morales. 2015. Fertilización de cultivos con manejo de rastrojos. *INIA* 305: 84-105.
40. Zhang L., W.R. Dawes, G.R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3): 701-708.
41. Zhang Q., X. Lv, X. Yu, Y. Ni, L. Ma, Z. Liu. 2022. Species and spatial differences in vegetation rainfall interception capacity: A synthesis and meta-analysis in China. *Catena* 213.
42. Rubilar R., Hubbard R., Emhart V., Mardones O., Quiroga J., Medina A., Valnezuela H., Espinoza J., Burgos Y., Bozo D. 2020. Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: The impact of GxE interactions. *Forest Ecology and Management* 458.

## IX. ANEXOS



Anexo 1. Ejemplo de curva de estimación de los modelos sinusoidales ajustados.

Anexo 2. Tabla de coeficientes utilizados.

Coeficiente	Valor
k	0,5
$\tau_0$	0,55

Donde k es coeficiente de extinción y  $\tau_0$  es el valor crítico de  $\tau$  cuando la cobertura de dosel llega a su máximo