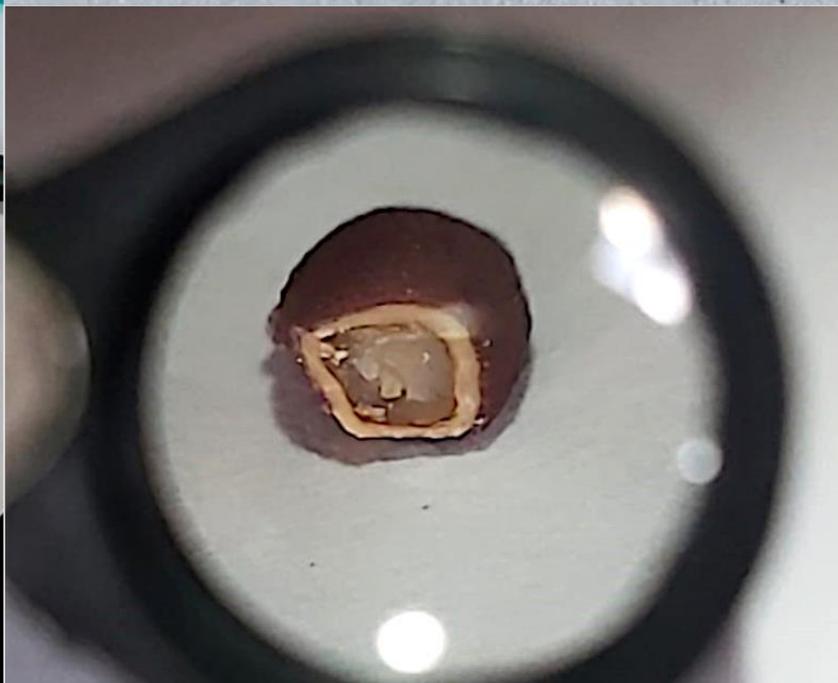


# CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL







## REVISTA CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL. INSTITUTO FORESTAL. CHILE

La revista Ciencia & Investigación Forestal es una publicación científico técnica, en español, publicada por el Instituto Forestal desde el año 1987. Es una publicación de acceso abierto, seriada, arbitrada, en formato digital y de carácter interdisciplinario.

En la Revista se divulga la investigación y ciencia forestal con una visión aplicada y orientada principalmente a profesionales y técnicos del sector forestal que demandan soluciones para sus problemas en el corto y mediano plazo, así como a profesionales del sector público y privado, investigadores, académicos, personeros con responsabilidad en la toma de decisiones técnico-políticas, y en general a la sociedad interesada en el conocimiento de los múltiples bienes y servicios que proveen los ecosistemas forestales.

Ciencia & Investigación Forestal publica contribuciones originales e inéditas de investigadores y profesionales, de instituciones nacionales o extranjeras, interesados en publicar investigación aplicada en el ámbito de las ciencias forestales y materias afines en las temáticas económicas, sociales y ambientales.

Todas las contribuciones presentadas a la revista son sometidas a un proceso de revisión por pares (*peer review*) bajo la modalidad de doble ciego.

La periodicidad de publicación es de tres números por año y ocasionalmente números especiales.

La Revista provee acceso libre a su contenido bajo el principio de hacer disponible la investigación al público para fomentar un mayor intercambio de conocimiento global. No existe costo por acceso a las contribuciones publicadas y los autores no asumen ningún costo por el procesamiento, revisión, edición y publicación de sus contribuciones.

En el sitio Web de la Revista (<https://revista.infor.cl>) es posible acceder a todos los números publicados y también encontrar toda la información referente a Equipo Editorial, Propiedad Intelectual, Declaración de Privacidad, Tipo de Contribuciones y la Guía y Recomendaciones para Autores. Se trata de una plataforma OJS (*Open Journal System*) en la cual, además de la información indicada, radica el manejo del flujo editorial de la Revista. Los autores deben a través de esta plataforma incorporar sus contribuciones, recibir posibles sugerencias de correcciones y finalmente enterarse de la aceptación o eventual rechazo de estas.

**Santiago Barros & Braulio Gutiérrez**  
Editores C&I Forestal  
[sbarros@infor.cl](mailto:sbarros@infor.cl) [bguetierr@infor.cl](mailto:bguetierr@infor.cl)





## CONTENIDO

### ARTÍCULOS

<b>Modelos de estimación de la densidad básica de la madera de <i>Acacia dealbata</i> y <i>A. mearnsii</i> mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR).</b>	<b>5</b>
Juan Pinilla Suárez; Felipe Navarrete Ulloa; Karina Luengo Vergara & Mauricio Navarrete Torres.	
<b>Simulación hidrológica del caudal del estero Huillinco en la microcuenca agroforestal Huillinco (Chonchi, región de Los Lagos, Chile) bajo condiciones climáticas históricas y futuras.</b>	<b>23</b>
Victor Hormazábal Valderrama; Victor Vargas Rojas; Rodrigo Abarca-del-Río; Ignacio García Torres; Enrique Villalobos Volpi & Héctor Ulloa Contreras.	
<b>Propiedades físico-mecánicas de la madera de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> de una plantación en Hidalgo, México.</b>	<b>51</b>
Cristina Sigala Cerros; Alfonso Suárez Islas; José Prieto Ruíz; Artemio Carrillo Parra; Pedro Domínguez-Calleros & José Rodolfo Goche-Télles.	
<b>Análisis genético de un ensayo de progenies de ulmo (<i>Eucryphia cordifolia</i>) en un sitio degradado de la región de Los Ríos, Chile.</b>	<b>63</b>
Roberto Ipinza Carmona; Alicia Ortega Zúñiga & María Molina Brand.	
<b>Crecimiento y supervivencia de cinco especies nativas en un ensayo de plantación con consideraciones genéticas, en bosque siempreverde estructuralmente alterado.</b>	<b>77</b>
Braulio Gutiérrez Caro & Roberto Ipinza Carmona.	
<b>Investigación silvícola y tecnológica de berries nativos de interés comercial en Patagonia: Prácticas de propagación y manejo.</b>	<b>87</b>
Jaime Salinas Sanhueza; Iván Moya Navarro & Alicia Uribe Mora.	
<b>APUNTES</b>	
<b>Informe de Gira Técnica: Utilización de técnicas nucleares para mejorar la adaptación y la productividad de especies forestales frente al cambio climático.</b>	<b>99</b>
Patricio Rojas Vergara.	





---

ARTÍCULO

## Modelos de estimación de la densidad básica de la madera de *Acacia dealbata* y *A. mearnsii* mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR).

Juan Pinilla Suárez<sup>1\*</sup>; Felipe Navarrete Ulloa<sup>1</sup>; Karina Luengo Vergara<sup>1</sup> & Mauricio Navarrete Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Forestal, sede Biobío, Chile. [jpilla@infor.cl](mailto:jpilla@infor.cl)

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.576>

Recibido: 20.12.2022; Aceptado: 30.03.2023

---

### RESUMEN

La densidad básica (DB) es una variable fundamental para caracterizar la madera. La DB se determina mediante la Norma Tappi T258-om94, sin embargo, se requieren metodologías que permitan estimarla en forma precisa, rápida y no destructiva. La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared) permitiría hacerlo y facilitar la planificación y toma de decisiones, pero antes esta metodología debe ser evaluada en diferentes especies.

Se probó el uso de espectroscopía NIR para estimar la DB de *Acacia dealbata* y *Acacia mearnsii* y comparar sus resultados con los de la metodología tradicional (Norma Tappi). Se utilizó polvo de astillado en estado seco obtenido de tarugos, y un análisis basado en modelos estadísticos de regresión multivariantes de mínimos cuadrados parciales, generando modelos de estimación individual por especie. Los modelos permitieron estimar la densidad básica a partir de una matriz de variables de absorción de energía de la muestra por cada longitud de onda de la luz emitida por el equipo. En *Acacia dealbata* la media del error del modelo predictivo fue  $-5,46 \text{ kg/m}^3$ , y en *Acacia mearnsii* de  $2,67 \text{ kg/m}^3$ . Estos resultados validan el uso de la espectroscopía NIR como herramienta para estimar DB, lo que además permite disminuir el costo y tiempo requerido en comparación con el método tradicional.

**Palabras clave:** Espectroscopía NIR, Densidad básica, *Acacia dealbata*, *Acacia mearnsii*, Bioenergía

### SUMMARY

Basic density (DB) is a fundamental variable to characterize wood. DB is determined by Tappi Standard T258-om94, however, methodologies are needed to estimate it accurately, quickly and non-destructively. NIR (Near Infrared) spectroscopy would allow this and facilitate planning and decision-making, but it must be first evaluated in different species.

The use of NIR spectroscopy was tested to estimate the DB of *Acacia dealbata* and *Acacia mearnsii* and compare its results with those of the traditional methodology (Norma Tappi). Dry chipping dust obtained from dowels, and an analysis based on multivariate partial least squares regression statistical models was used, generating individual estimation models per species. The models allowed estimating the basic density from a matrix of energy absorption variables of the sample for each wavelength of light emitted by the equipment. In *Acacia dealbata*, the mean error of the predictive model was  $-5.46 \text{ kg/m}^3$ , and in *Acacia mearnsii*, it was  $2.67 \text{ kg/m}^3$ . These results validate the use of NIR spectroscopy as a tool for estimating DB, which also reduces the cost and time required compared to the traditional method.

**Key words:** NIR Spectroscopy, Basic Density, *Acacia dealbata*, *Acacia mearnsii*

---

## INTRODUCCIÓN

El Programa Biomasa Forestal y Energía de INFOR investiga y genera información acerca de la caracterización de la madera y su uso en la generación de energía.

La densidad básica de la madera es el cociente entre el peso seco y el volumen en verde; valor que indica la cantidad de material leñoso, libre de humedad, disponible en un bosque.

Para estimar la densidad básica de la madera, primero se debe determinar su volumen máximo en estado verde, mediante desplazamiento de agua o medición directa, y luego secar las muestras de biomasa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  hasta obtener un peso constante. A partir de ello se calcula la densidad básica dividiendo el peso seco por el volumen en verde (Tappi, 1994).

Se ha estudiado densidad de la madera de diferentes especies forestales, ya que este valor se relaciona con la cantidad de materia seca producida por unidad de superficie, de cada especie a partir de un bosque a distintas edades y distanciamientos. A mayor densidad, mayor podrá ser la biomasa producida en un determinado sitio, lo que permite su clasificación y comparación con otras fuentes de biomasa forestal, determinando la cantidad de madera seca posible de obtener, cuyo valor debe ser comparado con los estudios disponibles.

La Espectroscopia en Infrarrojo Cercano o NIRs (*Near Infrared Spectroscopy*) es una herramienta utilizada para la caracterización de una variedad de productos de forma instantánea. La base de esta tecnología reside en asociar valores espectrales de una muestra (datos de absorbancia NIR) con parámetros cuantitativos y cualitativos, logrando un modelo matemático que permita la estimación de la variable de interés. Una vez generado el modelo requerido es posible utilizar el equipo para la estimación de diversos parámetros.

El objetivo del presente estudio es analizar la utilización de la espectroscopía NIR para estimar la densidad de la madera de las especies *Acacia dealbata* y *Acacia mearnsii*, y comparar sus resultados con los de la metodología tradicional (Norma Tappi).

## ANTECEDENTES

### Espectroscopia NIR para Estimar la Densidad Básica de la Madera

La espectroscopía NIR ha tenido gran adopción en diferentes industrias, incluido el sector forestal, donde existe la necesidad de estudios en análisis de parámetros físico-químicos en productos madereros y celulosa (Via, 2004). La absorbancia en algunas longitudes de onda del espectro NIR se asocia con los grupos funcionales de los polímeros que constituyen la madera, los que están a su vez, directa o indirectamente relacionados con las propiedades químicas y/o mecánicas. Una completa revisión se puede encontrar en Tsuchikawa & Koboro (2015).

Esta tecnología también se está implementando en las operaciones de cosecha forestal, donde equipos de cosecha mecanizada utilizan sensores para medir las dimensiones externas de los rollizos, generalmente diámetros con corteza y longitud.

Los procesos aplicados para la estimación de cada parámetro, conlleva a métodos normalizados. Es por esto, que se ve la opción de utilizar la tecnología NIR como un método para estimar parámetros fisicoquímicos en biomasa forestal, ya que, la detección espectral del infrarrojo cercano y visible (vis-NIR) es una tecnología de detección rápida y no destructiva (Everard *et al.*, 2012). Por otro lado, Posom *et al.* (2020) mencionan que la espectroscopia NIR es una medición rápida y sin contacto con productos químicos. Para la espectroscopia NIR, sólo se utilizan 2 a 3 segundos para la evaluación, y podría

utilizarse para la medición en línea, en estimación de las características de la biomasa en astillas de madera, madera molida y otras biomásas.

Hay variados estudios en la literatura relacionados a la predicción de propiedades físicas (densidad, ángulo microfibrilar, longitud de traqueidas), mecánicas (Modulo de rotura y elasticidad) y químicas (contenido de glucosa, lignina y extractivos) de la madera a partir de espectros NIR, los cuales se han llevado a cabo para coníferas y latifoliadas (Bailleres *et al.*, 2002; Schimleck *et al.*, 2004; Kelley *et al.*, 2004b; Via, 2004; Cooper *et al.*, 2011).

En la actualidad, diversas empresas dedicadas al rubro forestal en Chile utilizan esta tecnología para el cálculo de la densidad básica de la madera. En la Región del Biobío, la empresa Celulosa Arauco realiza toma de espectros a partir de viruta producida de muestras de tarugos de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. La empresa forestal CMPC en los Ángeles, también utiliza la espectroscopía NIR, para diferentes usos desde 1998.

Labbé *et al.* (2013) utilizaron el NIR para estimar densidad básica, evaluando la variación de la densidad en el sentido longitudinal del fuste y la precisión de la espectroscopia de infrarrojo cercano para predecir densidad y rendimiento pulpable en clones de *Eucalyptus globulus*, utilizando viruta, astilla y discos (rodela) en sitios de la Región de La Araucanía.

En un estudio de INFOR para determinar la densidad básica de la madera de distintas especies para su uso en energía, se analizó la opción de utilizar la Espectroscopía NIR y comparar sus resultados con los de la utilización de la metodología tradicional (Norma Tappi).

### Densidad Básica en Especies de Interés

Para *Acacia mearnsii*, la literatura señala que los valores medios de densidad básica fluctúan entre 530 y 598 kg/m<sup>3</sup>, siendo su madera dura, pero moderadamente fácil de trabajar y de pulir. En estado seco y húmedo es de dureza media (Kannegiesser, 1990). Pinilla (2000) señala también que esta especie presenta una densidad básica de aproximadamente 630 kg/m<sup>3</sup> y una densidad de la madera seca al aire de entre 550 y 800 kg/m<sup>3</sup>. Searle & Owen (2005), obtuvieron la densidad básica de la madera de distintas especies, en donde para *Acacia mearnsii* registraron valores medios de 663, 726, 651 y 664 kg/m<sup>3</sup>, según distintas procedencias descritas.

En cuanto a *Acacia dealbata*, Pinilla & Hernández (2010) reportaron densidades básicas de entre 320 y 540 kg/m<sup>3</sup> en 7 diferentes localidades de la Región del Biobío, en plantaciones de entre 4 y 6 años de edad. Ríos *et al.* (2017) mencionan distintos valores de densidad básica para *Acacia dealbata*, en la región del Biobío, según densidad del bosque y número de vástagos. Según este estudio, para bosques con densidad de 5.000 árboles/ha, y promedio de 7 vástagos por tocón, la densidad básica de la especie en promedio es de 440 kg/m<sup>3</sup>, para un bosque de 10.000 árboles/ha de densidad, y con un promedio de 6 vástagos por tocón, la densidad básica promedio fue de 450 kg/m<sup>3</sup>, y finalmente para un bosque de densidad 15.000 árboles/ha y 4 vástagos promedio por tocón, la densidad básica fue de 380 kg/m<sup>3</sup>, todas cifras similares a las registradas por Pinilla & Hernández (2010).

## MATERIAL Y MÉTODO

### Especies Analizadas

Durante el estudio se realizaron 2 modelos diferentes, utilizando las especies *Acacia mearnsii* y *Acacia dealbata*, utilizando muestras de rodela y viruta. En el Cuadro 1 se muestra las especies consideradas y el origen de la mismas.

**Cuadro 1.** Número de muestras obtenidos según especie, situación y sector.

Especie	Situación	Sector, Región	Número de muestras
<i>Acacia dealbata</i>	Asilvestrado	Chillán Viejo, Ñuble	19
<i>Acacia dealbata</i>	Plantado	Florida, Biobío	33
<i>Acacia dealbata</i>	Plantado	Los Sauces, Biobío	12
<i>Acacia dealbata</i>	Plantada	Cañete, Biobío	27
<b>Total <i>A. dealbata</i></b>			<b>91</b>
<i>Acacia mearnsii</i>	Plantado	Florida, Biobío	272
<i>Acacia mearnsii</i>	Plantado	Los Sauces, Biobío	32
<b>Total <i>A. mearnsii</i></b>			<b>304</b>

### Extracción de Muestras

Para estimar la densidad básica de la madera bajo la norma Tappi T258-om94, se usó rodela extraídas a 0,1m, 1,3m y a cada 1,6m de altura hasta que el fuste tenga un diámetro de 5 cm (**Figura 1**). La viruta se usó para la calibración y estimación de densidad básica mediante metodología NIR. La viruta fue obtenida en conjunto con la extracción de rodela, siendo reservada en bolsas de papel. Cada rodela y muestra de viruta fue tabulada con el mismo código, de manera de asociar ambas muestras como una (**Figuras 2 y 3**).



**Figura 1.** Obtención de rodela *Acacia dealbata*, Cañete



**Figura 2.** Rodela utilizadas en el estudio de densidad básica



Figura 3. Extracción de muestras de rodela y viruta

#### Obtención de Densidad Básica mediante Norma Tappi T258-om94

Una vez obtenidas las rodelas, las muestras fueron depositadas en recipientes, y posteriormente se cubrieron con agua. El objetivo de este paso, es saturar la rodela de agua, para simular el volumen de la rodela con su máximo nivel de humedad.

Para estimar el volumen de cada rodela, se utilizó el método de desplazamiento de agua, que consiste en depositar la rodela en un recipiente con agua, extraer la cantidad de agua que se desplazó al introducir la rodela en el recipiente, para luego pesarla. El agua posee una densidad aproximada de  $1 \text{ g/cm}^3$ , el peso del agua desplazada al depositar la rodela, equivale al volumen de la rodela en  $\text{cm}^3$ .

Las muestras se secaron en horno a temperatura  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , durante un mínimo de 72 horas (Figura 4). Las rodelas fueron pesadas diariamente, y se retiraron del horno una vez que se obtuvo peso constante, proceso regulado en Norma Tappi (1994).



Figura 4. Secado de rodelas

La densidad básica de la madera se obtuvo dividiendo el peso seco por el volumen saturado, obtenidos en los pasos anteriores (1).

$$DB = PS/VS \quad (1)$$

Donde:

DB = Densidad básica  
PS = Peso seco de la rodela (kg)  
VS = Volumen saturado de la rodela (cm<sup>3</sup>)

### Procesamiento de Muestras de Viruta

Las muestras de viruta se secaron en un horno Memmert ® a 103± 2 °C durante 24 horas, para luego ser tamizadas para homogenizar la granulometría de las partículas de polvo de astillas, utilizando un tamiz Prüfsieb ASTM-Nro.35 de granulometría 350 my, y rotuladas para sus análisis posteriores.

El material tamizado se depositó en viales de vidrio para espectroscopia de aproximadamente 28 cc para almacenar y coleccionar los espectros NIR del polvo de astilla, las cuales nuevamente fueron sometidos a un proceso de secado, a 103±2 °C, con la finalidad de extraer la humedad restante.

De cada muestra se obtuvo espectros NIR, utilizando un equipo portátil de espectroscopía, marca Thermo Scientific, Modelo microPHAZIR GP®, el cual posee un rango espectral de 1597 a 2397nm (6250 - 4166.67cm<sup>-1</sup>), con una resolución de 8nm, registrando la absorbancia. Cada colecta de espectros NIR, se hizo utilizando 5 mediciones por muestra y por triplicado, es decir 15 espectros por muestra (**Figura 5**). Los 15 espectros fueron promediados cada 5 lecturas, quedando finalmente 3 espectros para trabajar.

La información obtenida de las muestras se registró y almacenó en la biblioteca del equipo. Este valor permitió, una vez obtenida la densidad básica del árbol, calculadas por el método tradicional de cada muestra seleccionada, generar el par de datos, NIR-Densidad Básica Tappi.

El espectro obtenido en cada muestra fue promediado para proporcionar tres espectros por muestra, el que fue utilizado para predecir la densidad de la muestra (*Kelley et al., 2004a*).



Figura 5. Utilización equipo NIR MicroPhazir

## Set de Calibración y de Validación

Para la conformación de cada modelo predictivo en densidad básica de la madera, es necesario generar dos bases espectrales, una primera utilizada para la calibración de los modelos y una utilizada en la elaboración del set de validación. Para generar estas bases de datos, el 75% de las muestras fue destinado a la calibración y el 25% restante se destinó a la validación.

Con la base de calibración se generó un modelo de predicción mediante el software Thermo Scientific: Method Generator ® Version 4.0 R2, este modelo es utilizado por el equipo NIR para medir la densidad básica de la madera en laboratorio.

La base de predicción sirve para evaluar si el modelo realizado con la base de calibración es efectivo para la estimación de la variable de interés, se utilizan estándares de predicción como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada (RMSECV) y raíz cuadrática media del error estándar de predicción (RMSEP) para la validación de la regresión generada por el programa.

Para generar el modelo se utilizó regresión multivariante de mínimos cuadrados parciales (PLS).

Para el modelo individual de *A. dealbata*, se usó 91 muestras, lo que equivale a un total de 273 espectros. Se realizó una búsqueda de valores atípicos (fuera de rango) utilizando la función por defecto del programa, la cual consiste en coeficiente de correlación que se calcula mediante la distancia euclidiana, esto identificó un total de 27 muestras, cuyos espectros fueron eliminados, dejando una base final de 64 muestras (49 para calibración y 15 para validación), es decir, 192 espectros (3 espectros por muestra) (**Cuadro 2**).

Para el modelo individual de *A. mearnsii*, el mismo proceso generó 140 muestras, (105 para calibración y 35 para validación), lo que equivale a un total de 420 espectros (**Cuadro 2**).

**Cuadro 2.** Cantidad de muestras utilizadas en los sets de calibración y validación, para modelos quimiométricos individuales

Modelo	Tipo	Especie	Número de muestras (N° de espectros)		
			Calibración	Validación	Total
1	Individual	<i>A. dealbata</i>	49 (147)	15 (45)	64 (192)
2	Individual	<i>A. mearnsii</i>	105 (315)	35 (105)	140 (420)

## Modelos de Calibración en NIR

Para generar los modelos quimiométricos se utilizó regresión multivariable de mínimos cuadrados parciales (PLS), debido a la alta cantidad de variables de decisión y a la alta correlación que existe entre las variables de decisión. Se usó la base de espectros de calibración de cada modelo en el software, con cien variables de decisión, las cuales indican la cantidad de energía absorbida por la muestra en los diferentes niveles de longitud de onda emitida por la luz del equipo.

Se utilizó diferentes tratamientos de los espectros para conformar los modelos predictivos, siendo el suavizado de Golay, de primera derivada y 13 puntos de suavizado el más efectivo. Además, se restringió los rangos de las curvas, evaluando los intervalos de 1650-1800 nm y 2000-2300 nm., con el objetivo de mantener al margen la absorción del grupo funcional O-H, debido a que tiene gran relación con la humedad existente en la muestra. Este tratamiento se aplicó a ambos modelos predictivos.

Se aplicó el proceso del modelo PLS. Para esto se calculó 20 componentes PLS, con el método de validación cruzada "Full", este método lo que hace es retirar un espectro, y generar una estimación de su

densidad con los espectros restantes, esto lo hace con cada uno de sus espectros generando un modelo predictivo.

Se analizó el gráfico de la raíz cuadrática media del error estándar (RMSE) vs número de componentes PLS, que indica el número óptimo de componentes PLS o factores, a utilizar para la generación del modelo, que minimice la diferencia de los RMSE. También se analiza el gráfico de *loading* vs longitud de onda, que permite distinguir cuáles son las variables que más contribuyen en el modelo, además de indicar la cantidad de ruido o interferencia que se incluye, según la cantidad de componentes PLS que se agreguen.

## RESULTADOS

### Densidad Básica de la Madera Según Norma Tappi T 258-om94

Luego de realizar el protocolo establecido por la norma se obtuvo la densidad básica de cada muestra. Dichas densidades fueron promediadas por especie y sector, generando los primeros datos de estadística descriptiva. Los principales resultados obtenidos en los distintos ensayos según especies se presentan en el **Cuadro 3**.

**Cuadro 3.** Principales resultados en la estimación de densidad básica de la madera (Kg/m<sup>3</sup>)

Especie	Situación	Localidad	Densidad Básica promedio	Desviación Estándar	Valor Máximo	Valor Mínimo
<i>A. mearnsii</i>	Plantada con manejo	Florida	643,95	31,68	674,72	568,23
<i>A. dealbata</i>	Asilvestrada	Chillán Viejo	533,02	37,58	595,75	459,46
<i>A. dealbata</i>	Plantada con manejo	Florida	475,31	39,09	553,42	377,78
<i>A. mearnsii</i>	Plantada sin manejo	Los Sauces	647,99	33,07	715,38	574,07
<i>A. mearnsii</i>	Plantada sin manejo	Los Sauces	662,71	38,69	747,77	609,52
<i>A. dealbata</i>	Plantada sin manejo	Los Sauces	519,69	53,00	598,17	428,57
<i>A. dealbata</i>	Plantada con manejo	Cañete	449,50	39,48	509,68	374,00

### Modelos de Calibración en NIR

Los espectros seleccionados para la base de calibración del modelo quimiométrico para estimar densidad básica de la madera en *Acacia dealbata* y *Acacia mearnsii*, se presentan a continuación (**Figuras 6 y 7**).

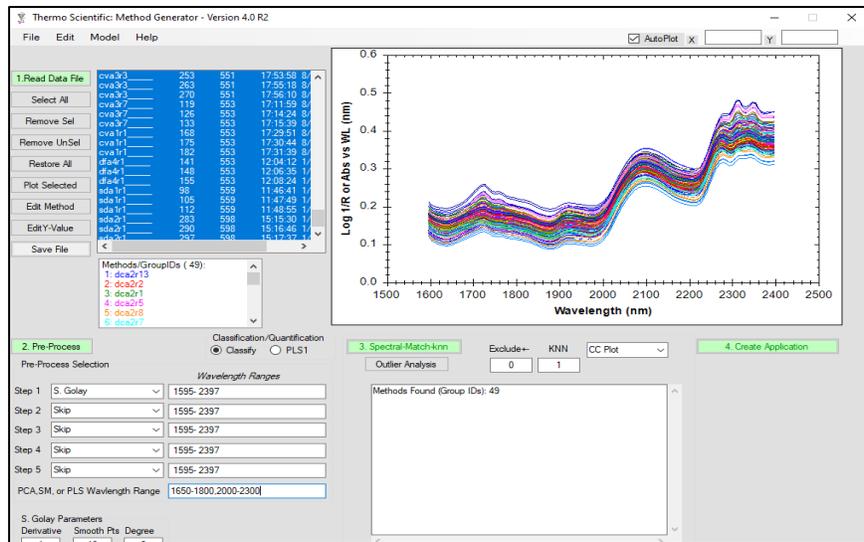


Figura 6. Espectros seleccionados en set de calibración de *Acacia dealbata*

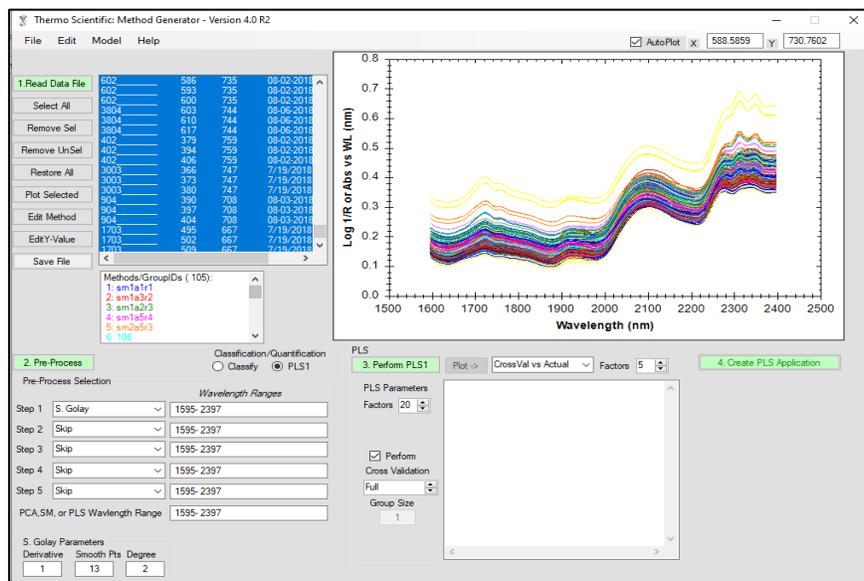


Figura 7. Espectros seleccionados en set de calibración de *Acacia mearnsii*

Tras aplicar el tratamiento de suavizado de los espectros, estos fueron procesados por el software para estimar la densidad básica de la madera (Figuras 8 y 9).

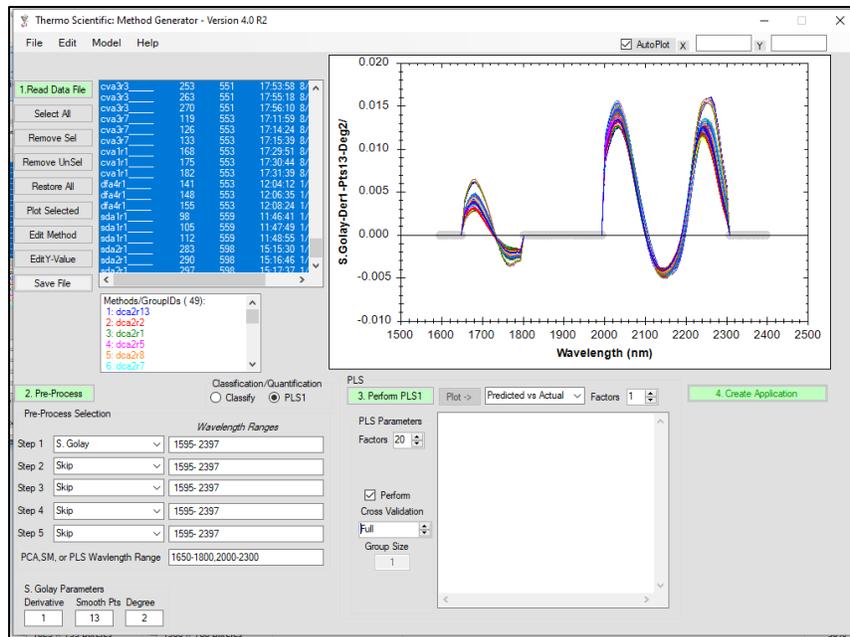


Figura 8. Tratamiento y suavizado de espectros de *Acacia dealbata*

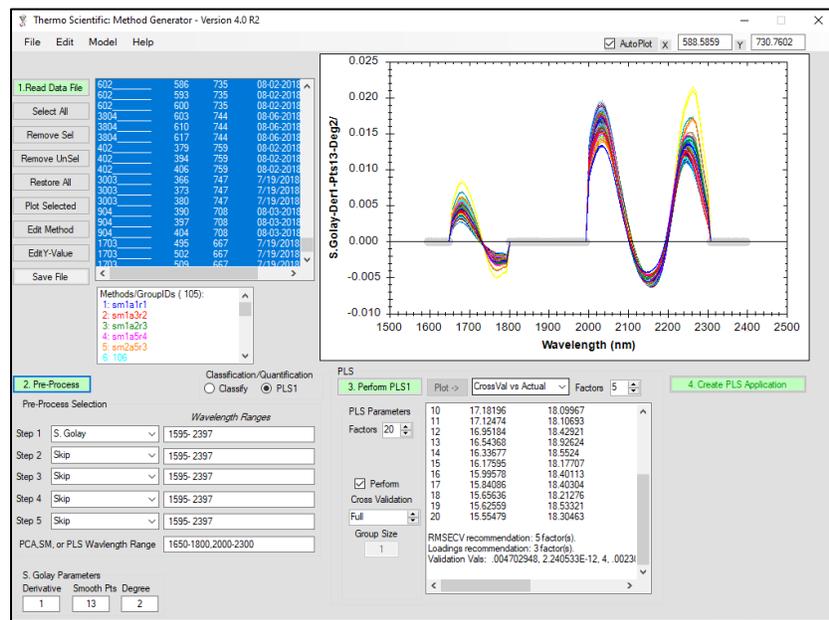


Figura 9. Tratamiento y suavizado de espectros de *Acacia mearnsii*

En el caso de *Acacia dealbata* los valores de la raíz cuadrática media del error estándar (RMSE) son altos en los primeros 3 componentes, y desde el cuarto componente en adelante, estos se mantienen cerca de los 20 Kg/m<sup>3</sup>. A medida que se agreguen componentes de la regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales (PLS), las diferencias de raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada (RMSECV) y la raíz cuadrática media del error estándar de predicción, RMSEP, van en aumento, lo que significa que se agrega un mayor error e incertidumbre de la predicción. Por lo mismo, para generar el modelo quimiométrico, se recomienda utilizar 5 factores (Figuras 10 y 11). Las

estimaciones de densidad básica del modelo NIR, comparadas con los valores de densidad real según norma Tappi, muestra un coeficiente de determinación para el set de calibración del 80,68%, con un RMSECV de 20,86 kg/m<sup>3</sup> (Figura 12).

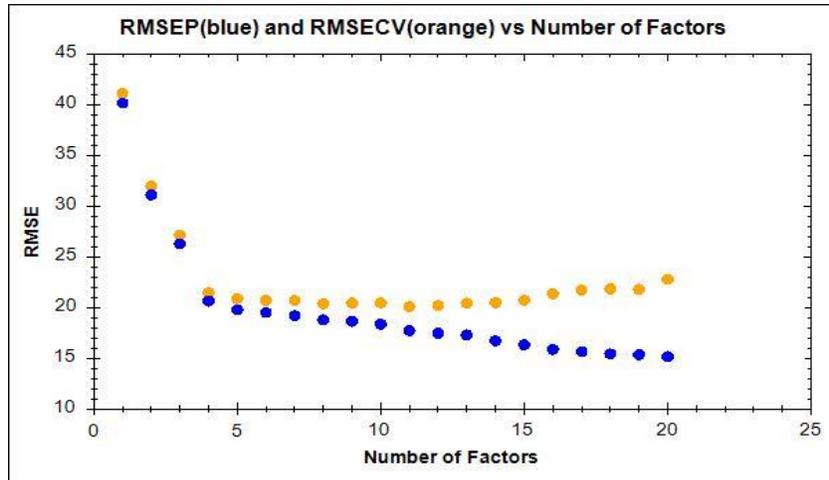


Figura 10. RMSE vs componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia dealbata*. (RMSECV:raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada. RMSEP: raíz cuadrática media del error estándar de predicción)

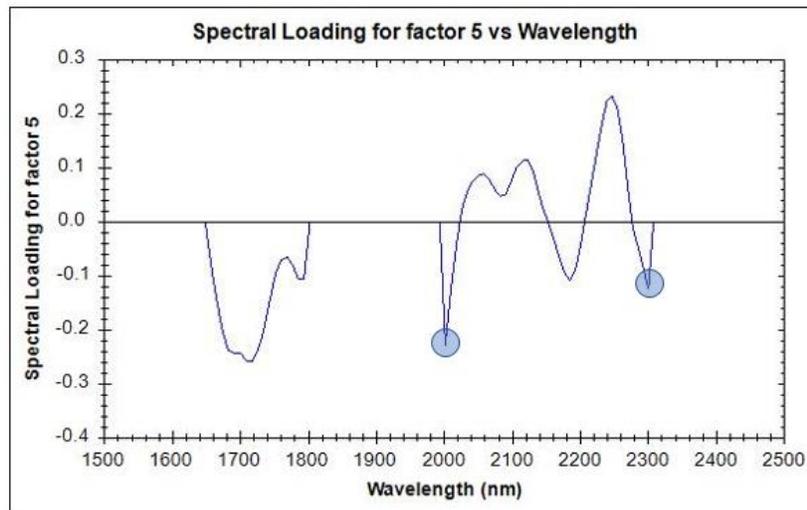
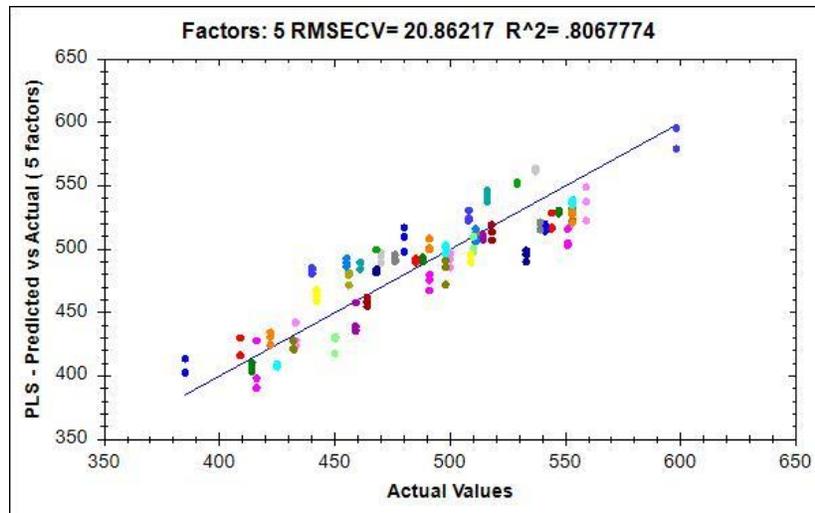
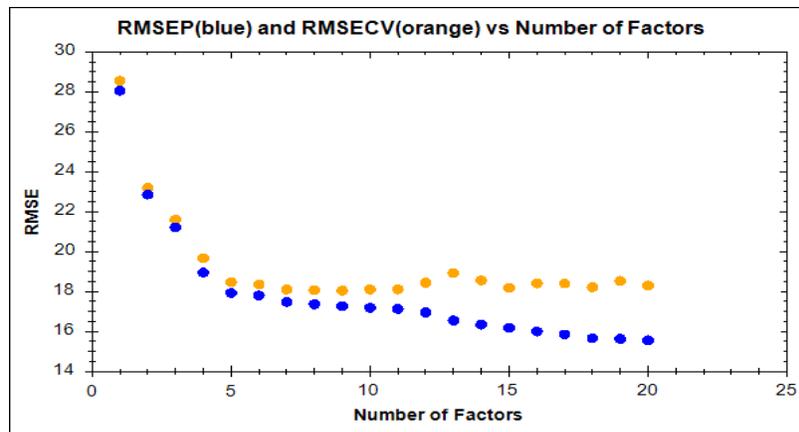


Figura 11. Gráfico loading con 5 componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia dealbata*



**Figura 12.** Modelo de calibración de densidad básica para *Acacia dealbata*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

En el caso de *Acacia mearnsii* se observa que los RMSE son altos en los primeros 4 componentes. Desde el quinto componente en adelante, estos se mantienen cerca de los 18 Kg/m<sup>3</sup>, y a medida que se agreguen componentes PLS, aumenta el error e incertidumbre de la predicción (**Figuras 13 y 14**). La comparativa entre los valores de densidad reales y estimados por el modelo NIR obtiene un coeficiente de determinación para el set de calibración del 81,01%; con un RMSECV de 18,47 kg/m<sup>3</sup> (**Figura 15**).



**Figura 13.** RMSE vs componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia mearnsii*. (RMSECV:raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada. RMSEP: raíz cuadrática media del error estándar de predicción)

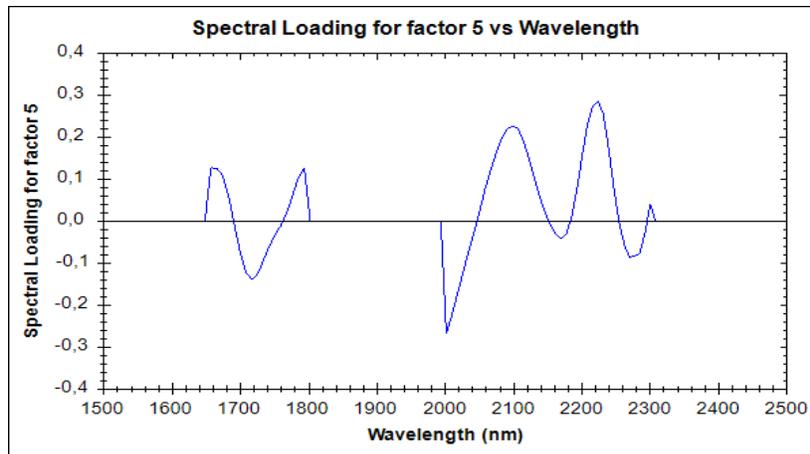


Figura 14. Gráfico loading con 5 componentes PLS, *Acacia mearnsii*

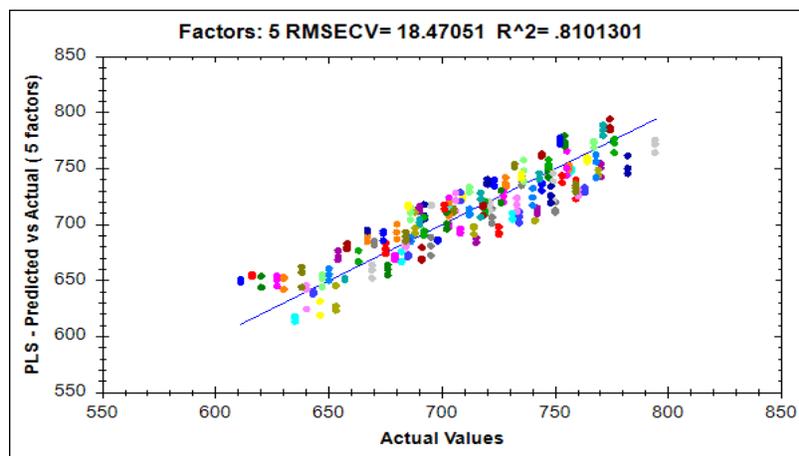
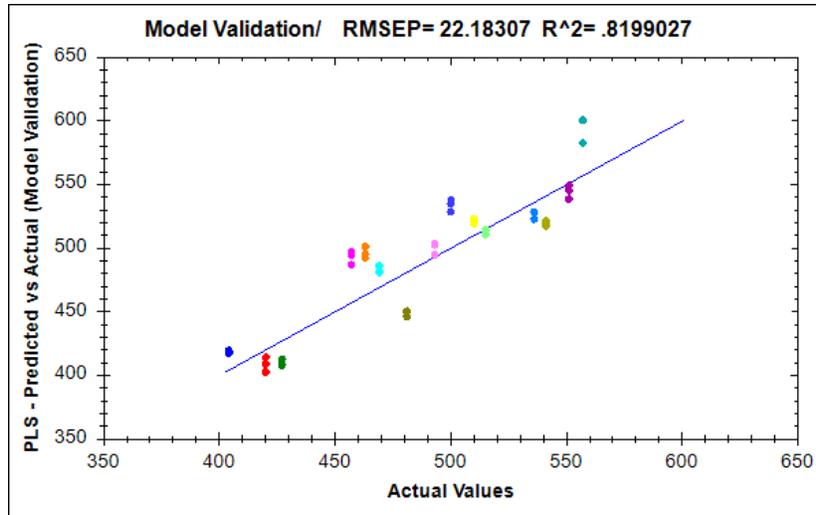


Figura 15. Modelo de calibración de densidad básica para *Acacia mearnsii*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

### Validación de los Modelos de Calibración

- *Acacia dealbata*

La validación del modelo de *A. dealbata*, obtiene un coeficiente de determinación de 0,82 con un RMSEP de 22,18 Kg/m<sup>3</sup> (Figura 16). Al compararse con el set de calibración, se observa que los valores entre ambos índices son muy similares, la diferencia entre los RMSE es de 1,34 kg/m<sup>3</sup> (Cuadro 4). La media del error asociado a este modelo predictivo es de -5,46 kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 16.** Modelo de validación de densidad básica para *Acacia dealbata*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

**Cuadro 4.** Resultados Modelo quimiométrico individual predictivo de densidad básica para *Acacia dealbata*

Parámetro	Valor
RMSE	22,18
Error Promedio	-5,45
R <sup>2</sup>	0,82
Pendiente	0,98
Coefficiente de compensación	13,67

El modelo resultante corresponde al de la expresión (2)

$$\hat{Y} = 13,67676 + 0,9831617X \quad (2)$$

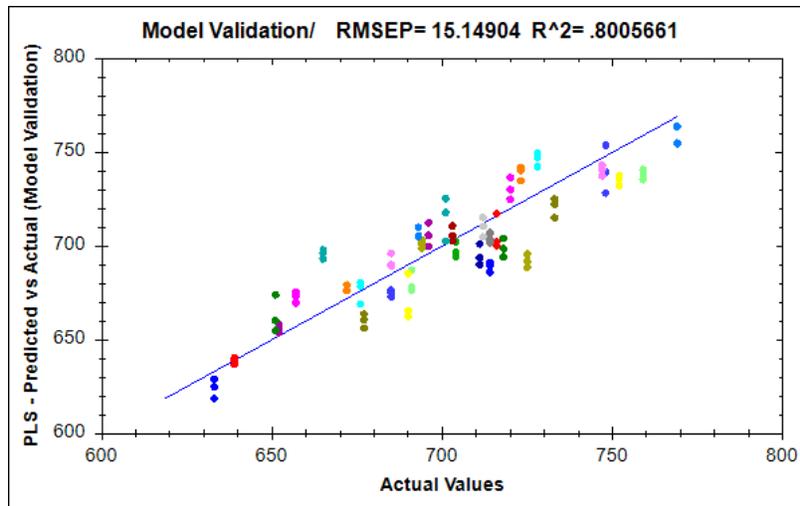
Donde;

$\hat{Y}$  = Vector de densidades básicas estimadas.

X = Matriz de variables de absorción de energía de la muestra, por cada longitud de onda de la luz emitida por el equipo, que permiten estimar la densidad básica de la madera en *Acacia dealbata*.

- *Acacia mearnsii*

El set de validación perteneciente al modelo individual de *A. mearnsii*, evaluado en el modelo generado a partir del set de calibración respectivo, obtiene un coeficiente de determinación de 0,80 con un RMSEP de 14,98 kg/m<sup>3</sup> (**Figura 17**). Al compararse con el set de calibración, se observa que los valores entre ambos índices son muy similares, la diferencia entre los RMSE es de 3,5 kg/m<sup>3</sup> (**Cuadro 5**). La media del error asociado a este modelo predictivo es de 2,67 kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 17.** Modelo de validación de densidad básica para *Acacia mearnsii*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

**Cuadro 5.** Resultados Modelo quimiométrico individual predictivo de densidad básica para *Acacia mearnsii*

Parámetro	Valor
RMSE	15,15
Error Promedio	2,67
R <sup>2</sup>	0,80
Pendiente	0,84
Coficiente de compensación	110,54

El modelo resultante se presenta en la expresión (3)

$$\hat{Y} = 110,5423 + 0,8386218X \quad (3)$$

Donde;

$\hat{Y}$  = Vector de densidades básicas estimadas,  
 $X$  = Matriz de variables de absorción de energía de la muestra, por cada longitud de onda de la luz emitida por el equipo, que permiten estimar la densidad básica de la madera en *A. mearnsii*.

## DISCUSIÓN

### Comparación de Densidad Básica Tappi y NIR

El **Cuadro 6** resume la comparación entre las densidades reales (metodología Tappi) y las densidades estimadas (metodología NIR).

**Cuadro 6.** Estadística descriptiva, Norma Tappi vs metodología NIR para estimación de densidad básica en madera de *Acacia dealbata* y *Acacia mearnsii*

Especie	Densidad básica media (kg/m <sup>3</sup> )		Error Mínimo (kg/m <sup>3</sup> )	Error Máximo (kg/m <sup>3</sup> )	Media del error (kg/m <sup>3</sup> )	Raíz cuadrática media del error estándar (Kg/m <sup>3</sup> )
	Tappi	(NIR)				
<i>Acacia dealbata</i>	488,27	493,72	0,4502	43,77	-5,46	22,18
<i>Acacia mearnsii</i>	689,89	688,59	0,3165	36,37	2,67	15,15

En promedio la diferencia entre los métodos de estimación de densidad básica de la madera fue de solo 5,45 kg/m<sup>3</sup>, con una raíz media del error de 22,18 Kg/m<sup>3</sup>. Esto quiere decir, que las estimaciones obtenidas por el NIR, varían en menos del 5% (4,54%) con respecto al valor calculado mediante la norma Tappi, sin existir diferencias significativas entre ambos métodos.

La media del porcentaje de error de cada estimación, es de 3,89%; también menor a 5%. Estos índices se consideran aceptable para el modelo quimiométrico. Por otro lado, las magnitudes de los errores fluctuaron entre los 0,45 kg/m<sup>3</sup> y 43,77 kg/m<sup>3</sup>, rango aceptable para la estimación de densidad básica de la madera en *Acacia dealbata*.

En el caso de *Acacia mearnsii*, la diferencia entre las densidades reales y las densidades estimadas, fue de solamente 2,67 kg/m<sup>3</sup>, con una raíz media del error de 15,15 kg/m<sup>3</sup>. Esto quiere decir, que las estimaciones obtenidas por el NIR, varían en promedio un 2,14% con respecto al valor calculado mediante la norma Tappi, error menor al 5%. La media del porcentaje de error de cada estimación, es de 1,78%; también menor a 5%. Estos índices se consideran aceptable para el modelo quimiométrico. Las magnitudes de los errores fluctuaron entre los 0,32 kg/m<sup>3</sup> y 36,37 kg/m<sup>3</sup>, rango aceptable para la estimación de densidad básica de la madera en *Acacia mearnsii*.

Respecto de la metodología utilizada, Nisgoski *et al.* (2015) mencionan que la forma y granulometría de las muestras influye en la discriminación de las especies del género *Salix* por espectroscopía de infrarrojo cercano.

Previamente, Pinilla *et al.* (2021) señalaban que la utilización del NIR, un proceso no destructivo, para la estimación de la densidad básica de la madera, generó valores similares a la norma Tappi, concluyendo que la metodología NIR es adecuada para una estimación de este parámetro. Agregan que, observando los tiempos de la preparación de las muestras, el tiempo empleado para el proceso bajo la norma Tappi, es prolongado, no así al emplear la metodología del equipo NIR, con un importante ahorro en tiempo para poder obtener la variable deseada.

## CONCLUSIONES

Para usar biomasa forestal como energía renovable se requiere conocer las características físicas y químicas de la materia prima, siendo la densidad básica de la madera una de las variables físicas más importantes. A su vez, para estos análisis son deseables metodologías que permitan caracterizar la materia prima en forma precisa, rápida e idealmente a través de un proceso no destructivo. La espectroscopía NIR es una opción apropiada para ese fin, sin embargo, requiere ser evaluada en cada especie para obtener los parámetros requeridos.

Las estimaciones obtenidas usando espectroscopía NIR varían en promedio un 2,14% con respecto al valor calculado mediante la norma Tappi.

Los resultados obtenidos a partir del uso de los modelos desarrollados se consideran aceptable para el modelo quimiométrico, concluyendo que serían eficientes para obtener la densidad básica de la madera.

Una vez generados los modelos NIR, el tiempo requerido para efectuar las estimaciones de densidad básica es muy breve, ventaja que se suma a la de ser un método no destructivo.

Es recomendable aumentar la base de datos del equipo NIR, incorporando información de otras especies forestales con el objetivo de mejorar y generar un set de modelos de estimación y con ello obtener estimaciones más certeras.

El análisis de los resultados y modelos obtenidos permiten concluir que la utilización de la Espectroscopía NIR es posible de utilizar para estimar la densidad de la madera de las especies *Acacia dealbata* y *Acacia mearnsii*.

## REFERENCIAS

- Bailléres, H., Davrieux, F. & Ham-Pichavant, F. (2002). Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. *Annals of Forest Science*, N°59. Pp: 479-490. <https://doi.org/10.1051/forest:2002032>
- Cooper, P., Jeremic, D., Radivojevic, S., Ung, Y. & Leblon, B. (2011). Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products. *The Role of Sensors in the New Forest Products Industry and Bioeconomy. Canadian Journal of Forest Research*, 41(11): 2150-2157. <https://doi.org/10.1139/x11-088>
- Everard, C.D., Fagan, C.C., & McDonnell, K.P. (2012). Visible-Near Infrared Spectral Sensing Coupled with Chemometric Analysis as a Method for on-line Prediction of Milled Biomass Composition Pre-Pelletising. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, N°20. Pp: 361-369. <https://doi.org/10.1255/jnirs.997>
- Kannegiesser, U. (1990). Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Willd. *Ciencia & Investigación Forestal*, 4(2): 195-212. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1990.141>
- Kelley, S., Rials, T., Snell, R., Groom, L. & Sluiter, A. (2004 a). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, (38):257-276. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5>
- Kelley, S., Rials, T., Groom, L. & So, G. (2004 b). Use of near infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods. *Holzforschung*, 58(3): 252-260. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.039>
- Labbé, R., Droppelmann, F., Balocchi, C. & Peredo, M. (2013). Variación de la densidad de la madera y rendimiento pulpable en clones de *Eucalyptus globulus* evaluado con espectroscopia de infrarrojo cercano. *Bosque*, 34(3): 263-272. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000300002>
- Nisgoski, S., Carneiro, M. & Bolzon de Muñiz, G. (2015). Influencia de la granulometría de la muestra en la discriminación de especies de *Salix* por infrarrojo cercano. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 17(1): 195-204. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000019>
- Pinilla, J.C. (2000). Descripción y Antecedentes Básicos sobre *Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon* y *Acacia mearnsii*. Revisión bibliográfica. INFOR. Informe Técnico N°147. Concepción, Chile. 51p.
- Pinilla, J.C. & Hernández, G. (2010). Poder Calorífico de *Acacia dealbata* Link crecida en Chile. INFOR. Informe Técnico N°16. Concepción, Chile. 35p. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2010.354>
- Pinilla, J.C., Navarrete, F., Luengo, K., González, J., Navarrete, M. & Acevedo, J. (2021). Aplicación de la metodología seis sigmas para mejorar la calidad de la estimación de densidad básica de la madera en *Acacia mearnsii*. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(1): 19-41. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.470>
- Posom, J., Maraphum, K., & Phuphaphud, A. (2020). Rapid Evaluation of Biomass Properties Used for Energy Purposes Using Near-Infrared Spectroscopy. In: Taner, T., Tiwari, A. & Ustun, T.S. (Eds). *Renewable Energy - Technologies and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90828>.
- Rios, J., Acuña, E., Cancino, J., Rubilar, R., Corral, J. & Rosales, R. (2017). Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas. *Agrociencia*, 51(2): 215-227. Colegio de Postgraduados Texcoco, México.

- Schimleck, L., Jones, P., Peter, G., Daniels, R. & Clark, A. (2004).** Nondestructive estimation of tracheid length from sections of radial wood strips by near infrared spectroscopy. *Holzforschung*, N°58. Pp: 375-381. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.057>
- Searle, S.D. & Owen, J.V. (2005).** Variation in basis wood density and percentage heartwood in temperate Australian *Acacia* species. *Australian Forestry*, N°68. Pp: 126-136. <https://doi.org/10.1080/00049158.2005.10674956>
- TAPPI (1994).** Basis density and moisture content of pulpwood. T. 258 om – 94. 8p. En: <https://www.tappi.org/content/SARG/T258.pdf>.
- Tsuchikawa, D. & Koboro, H. (2015).** A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *J. Wood Sci.*, N°61. Pp: 213-220. Japan. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>
- Via, B. (2004).** Modeling longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) wood properties using near infrared spectroscopy. A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agriculture and Mechanical College. In: Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy.



---

ARTÍCULO

## **Simulación hidrológica del caudal del estero Huillinco en la microcuenca agroforestal Huillinco (Chonchi, región de Los Lagos, Chile) bajo condiciones climáticas históricas y futuras.**

Victor Hormazábal Valderrama<sup>1\*</sup>; Victor Vargas Rojas<sup>1</sup>; Rodrigo Abarca-del-Río<sup>2</sup>; Ignacio García Torres<sup>1</sup>; Enrique Villalobos Volpi<sup>1</sup> & Héctor Ulloa Contreras<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, Chile. [vhormazabal@infor.cl](mailto:vhormazabal@infor.cl)

<sup>2</sup>Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Chile.

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.583>

Recibido: 27.12.2022; Aceptado: 25.04.2023

---

### RESUMEN

La alteración del comportamiento de las precipitaciones es uno de los efectos más relevantes del cambio climático. Este modifica el balance y disponibilidad hídrica de las cuencas, disminuyendo la escorrentía superficial. En este trabajo se estima el comportamiento del caudal del estero Huillinco, en la microcuenca agroforestal homónima, de la comuna de Chonchi (Chiloé). Se simuló hidrológicamente la microcuenca en el periodo 1981-2100, usando el modelo y software WEAP (versión gratuita) y considerando el escenario de cambio climático SSP5-8.5. La información de entrada para estimar el caudal simulado provino de bases de datos, tanto *in situ* como de reanálisis cercano a la zona de estudio, así como de datos aproximados de consumo (habitantes y cultivos). Se crearon series temporales para la precipitación y temperatura con los datos *in situ*, que se usaron como base para una corrección de sesgo para ERA5-Land (histórico, 1981-2020) y el promedio bayesiano de modelos (futuro, 2021-2100). Se concluye que el caudal simulado del estero Huillinco marca una tendencia negativa en el periodo de estudio de  $\approx -13,4$  L/s por decenio, para todas las temporadas del año. Las anomalías estandarizadas de los promedios por cada decenio, muestran en el periodo de 1981-1990 un valor de  $\approx 1,2$  desviaciones estándar con respecto a la media de la serie, y de 1,6 en el periodo 2091-2100. Los resultados son preliminares, esperándose obtener una mejor proyección en el futuro mediante calibración con mediciones de caudal *in situ*.

**Palabras Claves:** Cambio climático, Microcuenca agroforestal, Chiloé, WEAP, SSP5-8.5

### SUMMARY

The alteration of precipitation behavior is one of the most relevant effects of climate change. This modifies the water balance and availability of watersheds, reducing surface runoff. This work estimates the flow behavior of the Huillinco stream, in the agroforestry micro-watershed of the same name, in the commune of Chonchi (Chiloé). The microbasin was hydrologically simulated for the period 1981-2100, using the WEAP model and software (free version) and considering the climate change scenario SSP5-8.5. The input information for estimating the simulated flow came from databases, both *in situ* and from reanalysis near the study area, and from approximate consumption data (inhabitants and crops). Time series for precipitation and temperature were created with the *in situ* data, and then used as the basis for applying a bias correction for ERA5-Land (historical, 1981-2020) and Bayesian model averaging (future, 2021-2100). It is concluded that the simulated flow of the Huillinco estuary marks a negative trend over the study period of  $\approx -13.4$  L/s per decade, for all seasons of the year. The standardized anomalies of the averages for each decade, show in the period 1981-1990 a value  $\approx 1.2$  standard deviations with respect to the mean of the series, and of 1.6 in the period 2091-2100. The results are preliminary, and a better projection is expected to be obtained in the future through calibration with *in situ* flow measurements.

**Keywords:** Climate Change, Agroforestry microbasin, Chiloé, WEAP, SSP5-8.5

---

## INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es un bien esencial no solo para el consumo humano, sino también para las actividades productivas, tales como, la industria, la agricultura y la minería, entre otros. Además, esto no solo involucra al hombre o sus actividades productivas, sino que también impacta directamente los diferentes ecosistemas, donde pequeños cambios respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos pueden causar alteraciones significativas.

Trenberth (2011) comenta que existe una influencia directa del calentamiento global sobre las precipitaciones, donde las áreas más secas podrían secarse aún más (generalmente en los subtropicos) y las áreas más húmedas incrementar esta característica, especialmente en latitudes medias a altas (asumiendo cambios moderados en los vientos). El periodo actual de sequía meteorológica en Chile central (30-38°S), conocido como “megasequía”, desde 2010 hasta la actualidad<sup>1</sup> (Garreaud *et al.*, 2020), posiblemente atribuible a una combinación de forzantes externas (antropogénicas) y a la variabilidad natural (Boisier *et al.*, 2016), podría implicar un cambio en la dinámica y disponibilidad hídrica dentro de las cuencas hidrográficas del país (Escenarios Hídricos 2030 Chile, 2018).

Según informa Montes (2021), la última actualización del informe del balance hídrico nacional (DGA, 2017), revela que algunos caudales de agua superficial de las mayores cuencas de la zona central hacia el sur han disminuido de 13 a 37% en los últimos 30 años. Las proyecciones en el mismo trabajo tampoco son alentadoras, pues se prevé incrementos de la temperatura de hasta los 2,5°C y disminución de precipitaciones en 50% entre 2030 y 2060.

Sin embargo, la extensión del territorio chileno da espacio a distintos tipos de climas dependiendo de la latitud (por ejemplo, siguiendo la clasificación climática de Kottke *et al.*, 2006), provocando que los posibles cambios en la disponibilidad hídrica superficial no sean homogéneos a lo largo del territorio, además de considerar las características geomorfológicas propias de cada lugar.

En el sur de Chile, la región de Los Lagos presentó problemas de escasez hídrica en el sector rural, aumentando la cantidad de afectados desde 18.164 personas el año 2013, hasta las 60.088 personas en 2016 (Frêne *et al.*, 2022). Entre abril y octubre del año 2021 se decretó escasez hídrica en la provincia de Chiloé (DGA, 2021). También, en Quintana-Ruedlinger (2020) se advierte que Chiloé está perdiendo sus más importantes reservorios de agua dulce debido a la extracción descontrolada del musgo *pompón*, el cual es muy importante para el ciclo hidrológico del territorio.

Fernández-Alberti *et al.* (2021) mencionan que un escaso conocimiento de la hidrología de una cuenca puede provocar que las demandas de agua de los usuarios no fueran satisfechas; que es necesario conocer la evolución del balance hídrico para desarrollar estrategias que eviten tal escenario; y que las evaluaciones a escala de cuenca proporcionan información esencial para la gestión de los recursos hídricos, en particular para predicciones del suministro y la demanda de agua. Una manera de caracterizar las cuencas y estimar su balance hídrico es a través de modelos o simulaciones. Estos modelos o simulaciones además de intentar representar la realidad hídrica en el presente, también permiten explorar su comportamiento en el pasado, y hacer proyecciones en el futuro (e.g., Davie, 2008; Orrego *et al.*, 2016). Se han realizado varios estudios relacionados con recursos hídricos en distintas partes del mundo, utilizando modelos hidrológicos (e.g., Duque-Yaguache & Zambrano-Vázquez, 2015; Fanta *et al.*, 2022; Ibrahim *et al.*, 2022), y algunos también en Chile (e.g., Mena-Pardo, 2009; Vargas, 2012; Río-La Mura, 2015; Fernández-Alberti *et al.*, 2021; Hormazábal *et al.*, 2021; Fustos *et al.*, 2022).

El Instituto Forestal (INFOR) en su línea de Ecosistemas Forestales y Agua, realizó una primera estimación de la disponibilidad hídrica superficial, bajo condiciones históricas y futuras, de la microcuenca agroforestal Batuco (ubicada en la región de Ñuble, en la comuna de Ránquil; Hormazábal *et al.*, 2021). En tal sentido, en el presente trabajo se hace una estimación de la disponibilidad hídrica superficial, bajo condiciones históricas y futuras, de la microcuenca agroforestal Huillinco (ubicada en la región de los Lagos, comuna de Chonchi), utilizando metodologías similares a las ya utilizadas en Hormazábal *et al.*

---

<sup>1</sup> 2018, en el caso del estudio de Garreaud *et al.* (2020).

(2021). Esta evaluación tiene por objetivo estimar el caudal del estero Huillinco, entre enero de 1981 y diciembre de 2100, explorar el comportamiento de la variabilidad por decenio y sus tendencias. Además, se busca profundizar en las temporadas del año (verano, otoño, invierno y primavera). Todo esto se desarrolla en el escenario de cambio climático SSP5-8.5.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Área de Estudio

El área de estudio fue la microcuenca Huillinco, ubicada en el sur de Chile, en el centro-este de la Isla Grande de Chiloé (**Figura 1**). Se encuentra aproximadamente en las coordenadas UTM 18G X=593773 m; Y=5272967 m (centroide). Posee un área aproximada de 1.100 ha y pertenece a la subsubcuenca “Costera Vertiente Oeste Río Cucao y Río Medina” (MOP, 2014). La red de drenaje de la microcuenca Huillinco converge a un único estero (estero Huillinco), el cual nace en la parte este de la microcuenca a 92 msnm, mientras que desemboca finalmente al este del lago Huillinco a una altura de 5 msnm. El recorrido del estero Huillinco es de aproximadamente 6.000 m antes de desembocar en el lago Huillinco (**Figura 2**).

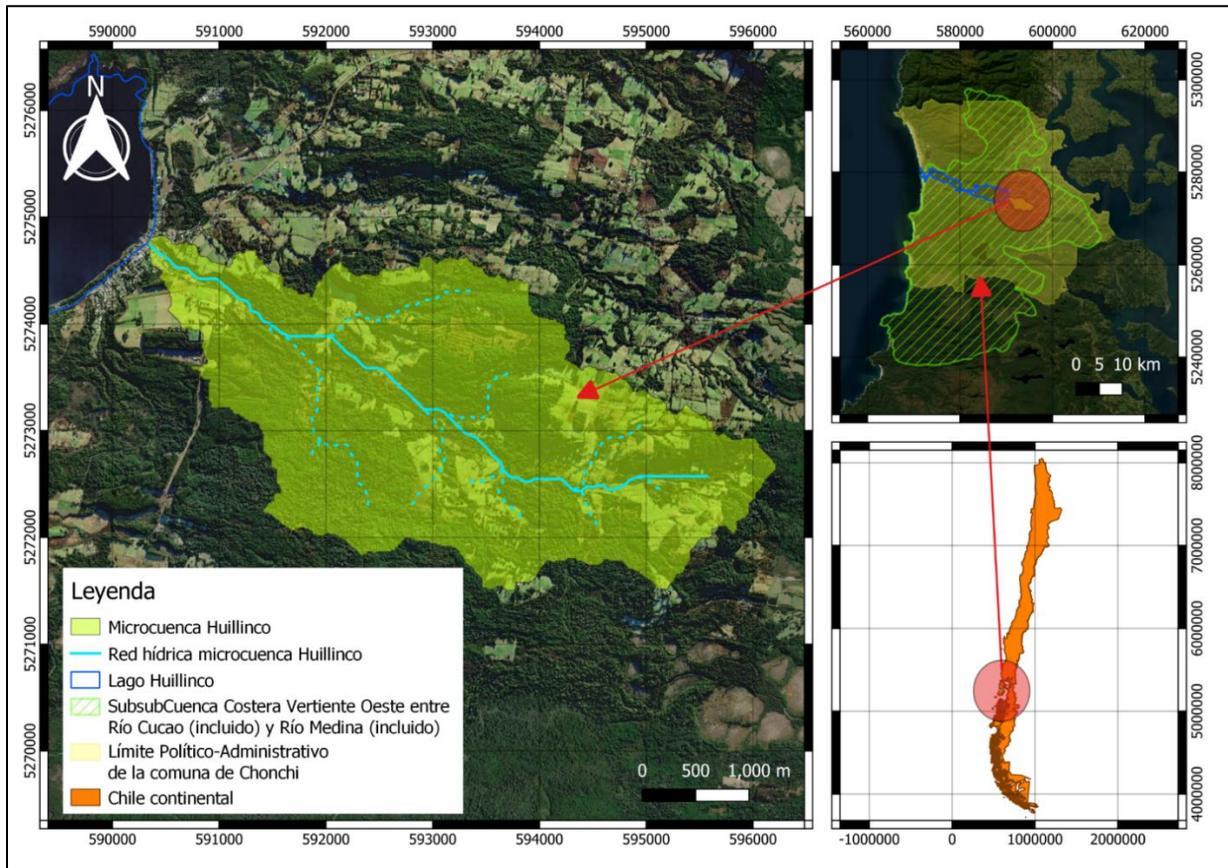


Figura 1. Zona de estudio

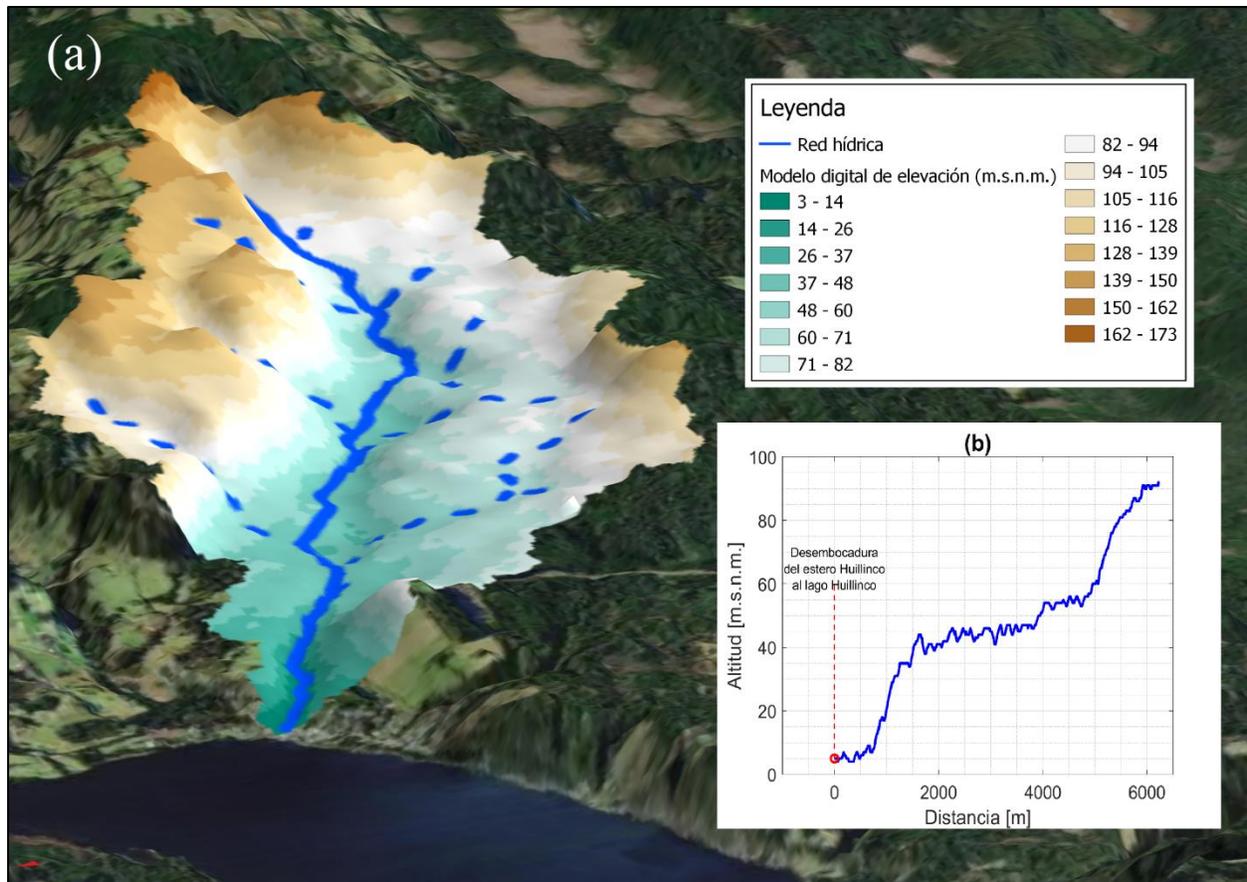


Figura 2. Modelo de elevación digital (a). Perfil vertical del estero huillinco (b).

Según INFOR (2021), la microcuenca Huillinco posee un comportamiento climático estacional. Presenta una temperatura media anual de 10,4°C y una precipitación acumulada anual de 1.650 mm. La mayor temperatura promedio mensual se da en el mes de febrero con 14,4°C, y la menor en julio con 6,6°C. La cantidad máxima de precipitación acumulada se concentra en el mes de junio con 243 mm, y la mínima en febrero con 63 mm. Según la clasificación climática de Köppen, la microcuenca Huillinco presentaría un clima Cfb (Kottek *et al.*, 2006), en otras palabras, inviernos fríos o templados, veranos frescos y las precipitaciones estarían bien distribuidas a lo largo del año.

### Información Disponible

En los alrededores de la zona de estudio, se recolectó información de 16 estaciones de monitoreo hidrometeorológicas extraídas en los sitios webs del explorador climático (CR2 *et al.*, 2022) y la red agrometeorológica INIA (INIA *et al.*, 2022). Esta información se resume en el Cuadro 1.

Adicionalmente se usaron los productos climatológicos ERA5 (Hersbach *et al.*, 2019) y ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019; 2021), para extraer la variable de cobertura total de nubes (tcc); y las variables de temperatura y precipitación, respectivamente (Cuadro 2).

**Cuadro 1.** Lista de estaciones meteorológicas usadas.

N	Nombre	Latitud	Longitud	Altura	Inicio observación	Fin observación*	Variables extraídas	Fuente
1	Butalcura	-42.26	-73.65	148	10/2009	12/2020	T,pp, hr,v	INIA
2	Tenaún	-42.31	-73.39	130	10/2019	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
3	Pid-pid	-42.41	-73.78	81	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
4	Huyar Alto	-42.40	-73.56	155	10/2009	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
5	Quilquico	-42.49	-73.70	109	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
6	Isla Chelín	-42.58	-73.53	33	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
7	Tara	-42.70	-73.78	145	02/2011	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
8	Aeródromo Quellón	-43.13	-73.63	13	08/2019	12/2020	T,pp,hr,v	DMC
9	Liceo agrícola de Ancud	-41.86	-73.81	31	12/2018	12/2020	T,pp,hr,v	DMC
10	Ancud 1	-41.8625	-73.8192	20	03/1992	09/2019	Pp	DGA
11	Chepu	-42.0464	-73.9742	20	01/1999	09/2019	Pp	DGA
12	Quemchi	-42.1408	-73.4731	5	11/1999	05/2020	Pp	DGA
13	Castro 1	-42.4581	-73.7744	50	03/1992	04/2009	Pp	DGA
14	Cucao	-42.6186	-74.1081	12	12/1996	09/2019	Pp	DGA
15	Chonchi	-42.6228	-73.7728	30	05/2010	09/2019	Pp	DGA
16	Quellón	-43.1086	-73.6119	50	04/1992	05/2020	Pp	DGA

\*Para el periodo en estudio  
pp = precipitación; T = temperatura; v = velocidad del viento; hr = humedad relativa.

**Cuadro 2.** Lista de datos de re análisis utilizados.

N	Fuente	Tamaño Pixel	Latitud	Longitud	Inicio reanálisis/simulación	Fin reanálisis/simulación	Variables
1	ERA5	≈0.25°x0.25°	-42.6	-73.75	01/2011	12/2020	T <sub>cc</sub>
2	ERA5-Land	≈0.1° x 0.1°	-42.6	-73.9	01/1950	12/2020	T,pp

Para las proyecciones de cambio climático, se utilizaron 2 simulaciones de 6 distintos modelos (**Cuadro 3**), participantes del proyecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Una simulación (para cada modelo) corresponde al experimento CMIP6-histórico (Eyring *et al.*, 2016), el cual abarca el periodo histórico desde 1850 a 2014; y la otra simulación corresponde al experimento SSP5-8.5<sup>1</sup> (O'Neill *et al.*, 2016), la cual corresponde al periodo futuro desde 2015 a 2100. Estas simulaciones pueden ser descargadas desde <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.

Para crear la red hídrica de la microcuenca Huillinco se dispuso de un Modelo Digital de Elevación (DEM), ofrecido por la Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE) de Chile para la región de Los Lagos, a una resolución espacial de 12,5 x 12,5 m a nivel global (CIREN, 2016).

Para crear la clasificación de uso de tipo de suelo, se utilizó el catálogo de CONAF correspondiente al uso de suelo del año 2019 (CONAF, 2021).

En la desembocadura de microcuenca Huillinco habitan cerca de 426 personas (INE, 2017), asumiéndose para efectos de la simulación hidrológica, que ellas se abastecen completamente de la microcuenca. Según se informa en Marticorena (2020), el consumo diario por persona en Chile es de 172 litros por día. En un ejemplo del SEI (2015), el consumo anual agrícola por hectárea fue de 3.500 m<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> La proyección de cambio climático SSP5-8.5, corresponde a la combinación de trayectorias más extrema por parte de las Trayectorias socioeconómicas compartidas o SSP (Riahi *et al.*, 2017), similar a la proyección RCP8.5 de las vías de concentración representativas o RCP (van Vuuren *et al.*, 2011). Resumidamente, se basa en un futuro de alto desarrollo humano, sustentado principalmente en energías obtenidas por combustibles fósiles.

Cuadro 3. Modelos climáticos parte del CMIP6.

N°	Modelos Climáticos	Referencias	Variables	Simulación	Resolución (Lat. x Lon.)	Instituto
1	ACCESS-ESM1-5	Ziehn <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	192x145	Australian Community Climate and Earth System Simulation
2	CESM2-WACCM	Danabasoglu <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	288x192	Community Earth System Model
3	CNRM-CM6-1	Voldoire <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f2	256x128	National Centre for Meteorological Research of France
4	GFDL-ESM4	Held <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f1	288x180	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
5	MRI-ESM2-0	Yukimoto <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f1	320x160	Meteorological Research Institute
6	Nor-ESM2-MM	Seland <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	288x192	Norwegian Earth System Model

### Estadísticos y Tratamiento de Datos

- *Anomalías Estandarizadas*

La anomalía estandarizada o “z” sirve para comparar variables con magnitudes muy dispares, convirtiéndolas en adimensionales. Tiene una media de 0 y una desviación estándar de 1. Se calcula de acuerdo a la **Expresión (1)**.

$$z = \frac{X - \bar{X}}{s_x} \quad (1)$$

Donde;

- z: valor individual estandarizado
- x: dato individual bruto
- $\bar{X}$ : media muestral de los datos brutos
- s<sub>x</sub>: desviación estándar muestral

Una forma de ver la anomalía estandarizada es como una medida de distancia (en unidades de desviación estándar), entre un valor de datos y su media. Además, al estandarizar los datos, estos serán adimensionales, lo cual permitiría compararlos con otros datos estandarizados, aunque su origen haya sido diferente (Wilks, 2005).

- *Tendencias*

El estimador Theil-Sen (Chervenkov & Slavov, 2019), es más robusto que el método de mínimos cuadrados, ya que es mucho menos sensible a valores atípicos. El estimador Theil-Sen se aplicó en este estudio utilizando el algoritmo desarrollado por Harynuk (2022), para el software MATLAB.

Por otro lado, para comprobar si existe realmente una tendencia en los datos de precipitación acumulada anual y de las temperaturas medias anuales, se utilizó el test de significancia Mann-Kendall (Glen, 2016). Tal test se utilizó a un 95% de confianza (*p-value* = 0,5). Este test se utilizó a través del algoritmo desarrollado por Thorvaldsen (2022), para el software MATLAB.

- *Coefficiente de Determinación*

Se usó el Coeficiente de Determinación o  $R^2$  (2) para estimar la varianza compartida que existe entre 2 variables X e Y. En este estudio se estimó al calcular el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (2)$$

Donde;

$\sigma_{XY}^2$  = covarianza,  
 $\sigma_X^2$  = varianza de X  
 $\sigma_Y^2$  es la varianza de Y.

- *Promedio bayesiano de modelos (BMA)*

El promedio bayesiano de modelos (BMA por sus siglas en inglés), obtiene ponderaciones para cada modelo, que a la vez producen combinaciones de modelos que tienen máxima probabilidad de coincidir con las observaciones históricas en comparación con otras combinaciones de modelos (Para una mayor información sobre esta metodología consultar [Hoeting et al. 1999](#) y [Hinne et al., 2020](#)).

En el contexto de este estudio, se usó los algoritmos MODELAVG ([Vrugt, 2018](#)) y DREAM ([Vrugt, 2016](#)) para el software MATLAB, para determinar los pesos de cada modelo descrito en el **Cuadro 3**. (Muchos estudios que involucran la meteorología y climatología han usado BMA, eg., [Raftery et al., 2005](#); [Slougher et al., 2007](#); [Bao et al., 2010](#); [Faidah et al., 2019](#); [Massoud et al., 2020](#); [Konapala et al., 2020](#)).

### Modelo Weap

El presente estudio se llevó adelante mediante el empleo del código *Water Evaluation And Planning System* o WEAP ([SEI, 2015](#)), en su versión gratuita, el cual presenta un sistema integrado de planificación de los recursos hídricos conectando los procesos hidrológicos y sus operaciones en una única plataforma analítica.

- *Unidad Hidrológica*

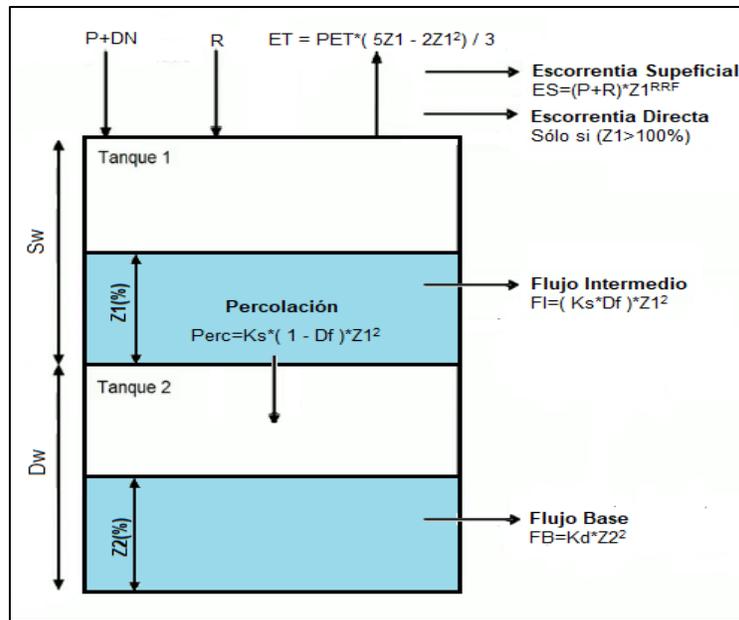
Para efectos de este estudio y apoyándose en ([Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & SEI, 2009](#)), se determinó por simplicidad que sólo existirá una unidad hidrológica<sup>1</sup> o *catchment*, el cual cubriría toda la microcuenca Huillinco, ya que la red hídrica converge casi en su totalidad al final de la microcuenca Huillinco (de Este a Oeste) (**Figura 1**).

- *Simulación Hidrológica*

Se utilizó el método de humedad del suelo, que representa el proceso precipitación-escorrentía en una unidad de respuesta hidrológica (en este caso la microcuenca Huillinco) por medio de dos estanques, con los cuales se busca reproducir los flujos superficiales y subterráneos ([SEI, 2015](#)) a una escala mensual. Este método unidimensional (**Figura 3**) se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, escurrimiento subsuperficial (flujo intermedio), y percolación profunda.

---

<sup>1</sup> La Unidad hidrológica es un área que separa la cuenca o subcuenca por bandas de elevación



**Figura 3.** Representación esquemática del módulo hidrológico para el método de humedad del suelo en weap (en base a SEI, 2015). **P** es la precipitación (mm); **DN** es el derretimiento de nieve (mm); **R** es la recarga de riego (mm); **ET** es la evapotranspiración real (mm); **PET** es la evapotranspiración potencial; **Z1** es el porcentaje de agua en el estanque superior (%); **Z2** es el porcentaje de agua en el estanque inferior (%); **Ks** es la conductividad hidráulica del estanque superior ( $mm \cdot mes^{-1}$ ); **Kd** es la conductividad hidráulica del estanque inferior ( $mm \cdot mes^{-1}$ ); **Df** es la dirección preferencial del flujo (adimensional), que separa el flujo superficial del subterráneo; **RRF**: coeficiente de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo (adimensional); **Sw** es la capacidad de estanque superior (mm) y **Dw** es la capacidad del estanque inferior (mm).

En la **Figura 3** se puede apreciar la conceptualización del método y las diferentes ecuaciones y criterios que se toman en cuenta al momento de representar la hidrología en una columna unidimensional.

De acuerdo con SEI (2015) las ecuaciones de balance en cada estanque son las de las **Expresiones (4)** y **(5)**

$$Sw \frac{dZ1}{dt} = \left[ P(t) - PET(t) \frac{5Z1 - 2Z1^2}{3} \right] - Pe(t)Z1^{RRF} - Df(Ks)Z1^2 - K_2(1 - Df)Z1^2 \quad (4)$$

$$Dw \frac{dZ2}{dt} = Kd(1 - Df)Z1^2 - KdZ2^2 \quad (5)$$

Donde;

Pe = precipitación más derretimiento de nieve (mm).

Las demás expresiones son las detalladas en la **Figura 3**.

Estas ecuaciones son empíricas y describen la dinámica de flujo que acontece en los estanques, los mismos que conceptualizan los componentes superficiales, subsuperficial y de percolación profunda del ciclo hidrológico.

La evapotranspiración potencial (PET), se puede descomponer como se indica en la **Expresión (6)**.

$$PET = Kc \times ET_0 \quad (6)$$

Donde;

$Kc$  = coeficiente de cultivo;

$ET_0$  = evapotranspiración potencial del cultivo de referencia.

La evapotranspiración potencial del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), se obtiene de la fórmula de Penman-Monteith que es la base del método 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998).

- *Demandas Dentro del Modelo*

Una vez obtenido un caudal simulado por el método de la humedad del suelo en un mes determinado, se procedió a utilizar la característica de planificación denominada zonas de demanda, disponible dentro del código WEAP (SEI, 2015), con la intención de obtener una mejor estimación de la variación del caudal total liberado por la microcuenca Huillinco en la desembocadura del estero Huillinco.

Se agregaron 2 zonas de demanda llamadas zona agrícola y zona urbana. Las características de estas zonas de demanda se detallaron anteriormente en la subsección información disponible de esta misma sección (metodología). Finalmente, el balance hídrico quedaría como se indica en la **Expresión (7)**.

$$Q_{Simulado}(t) - Q_{Agricola}(t) - Q_{Urbano}(t) = Q_{total}(t) \quad (7)$$

Donde;

$Q_{Simulado}$  = caudal simulado por el método humedad del suelo;

$Q_{Agricola}$  = caudal usado por la agricultura;

$Q_{Urbano}$  = el caudal consumido por la zona urbana;

$Q_{total}$  = total de caudal que se libera en la desembocadura del estero Huillinco;

$t$  corresponde a un mes determinado.

Se debe comentar que en  $Q_{simulado}(t)$  también se incluye el aporte del mes anterior ( $t-1$ ) que puede producir la microcuenca sin aportaciones de precipitación (flujo base), excepto para el principio de la simulación ( $t=1$ ).

## Caracterización Meteorológica y Climatológica

- *Precipitación y Temperatura*

Para la representatividad de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio con los datos *in situ*, se utilizaron curvas de isoyetas e isotermas respectivamente, siguiendo la metodología explicada en Duque-Yaguache & Zambrano-Vázquez (2015), y usada anteriormente en Hormazábal *et al.* (2021). Se utilizó una distribución temporal mensual. En el **Anexo 1** se pueden ver más detalles de la metodología aplicada a este estudio.

Una vez obtenidas las series de precipitación y temperatura *in situ* u observadas en la zona de estudio, se procedió a usar el periodo 2010-2020 para corregir el sesgo de los productos climáticos ERA5-Land y las proyecciones de cambio climático (**Cuadro 3**) en el periodo 2010-2020. En el **Anexo 2** se pueden ver detalles de esta corrección de sesgo.

Una vez obtenidas las series corregidas para las proyecciones de cambio climático, se estimó sus pesos para obtener un promedio ponderado de la mejor combinación de modelos que se ajuste a los datos observados (**Cuadro 4**). Con ello se obtuvo una única serie de cambio climático (para la precipitación y temperatura), la cual fue vuelta a corregir por sesgo en forma posterior.

**Cuadro 4.** Ponderaciones de cada modelo para construir las series de proyecciones de cambio climático

N°	Modelos CMIP6	Ponderación Precipitación	Ponderación Temperatura
1	ACCESS-ESM1-5	0.266	0.005
2	CESM2-WACCM	0.315	0.003
3	CNRM-CM6-1	0.029	0.163
4	GFDL-ESM4	0.142	0.776
5	MRI-ESM2-0	0.099	0.032
6	Nor-ESM1-M	0.149	0.021
<b>Total</b>	-	<b>1</b>	<b>1</b>

Para mejorar la confianza en la selección de BMA sobre los demás modelos individualmente, se realizó un diagrama de Taylor (Taylor, 2001), como se muestra en la **Figura 4**, a través del algoritmo de Rochford (2022). En ella se compararon las distintas alternativas (incluyendo BMA), donde se puede observar (visualmente) que la mejor opción a seleccionar era BMA, tanto para la precipitación como para la temperatura (gráficos a y b de la **Figura 4**, respectivamente). Además, se agregó a ERA5-Land, para tener una idea visual de su distancia en torno a sus valores observados.

Una vez obtenidos las series de precipitación y temperatura para el periodo histórico 1950-2020 (**Figuras 5a y 6a**, respectivamente; mostrados visualmente para el periodo 1981-2020) y para las proyecciones futuras 2021-2022 (**Figuras 5b y 6b**, respectivamente) se creó la serie final de precipitación (**Figura 5c**) y la serie final de temperatura (**Figura 6c**)<sup>1</sup>.

- *Otras Variables Meteorológicas*

Además de la precipitación y la temperatura, la simulación hidrológica necesita otras variables meteorológicas. Estas son la humedad relativa (**Figura 7a**) y la rapidez del viento (**Figura 7b**), las cuales fueron obtenidas desde las estaciones de monitoreo en Chiloé (**Cuadro 1**), siguiendo la misma metodología que la precipitación y temperatura (**Anexo 1**). Se usó la climatología obtenida entre 2010 y 2020 de estas dos variables, como una serie cíclica desde 1950 a 2100.

También se agregó como variable opcional la cobertura total de nubes (**Figura 7c**), con la intención de obtener una simulación más representativa. Esta variable se extrajo del producto ERA5 (**Cuadro 2**). Para la serie de cobertura total de nubes se usó la climatología obtenida entre 2010 y 2020, como una serie cíclica desde 1950 a 2100 (al igual que con la humedad relativa y la rapidez del viento).

<sup>1</sup> Se puede observar que la precipitación (**Figura 5c**) tiene una tendencia de -3,73 mm/decenio, mientras que la temperatura (**Figura 6c**) tiene una tendencia de 0,29 °C/decenio, para el periodo 1981-2100.

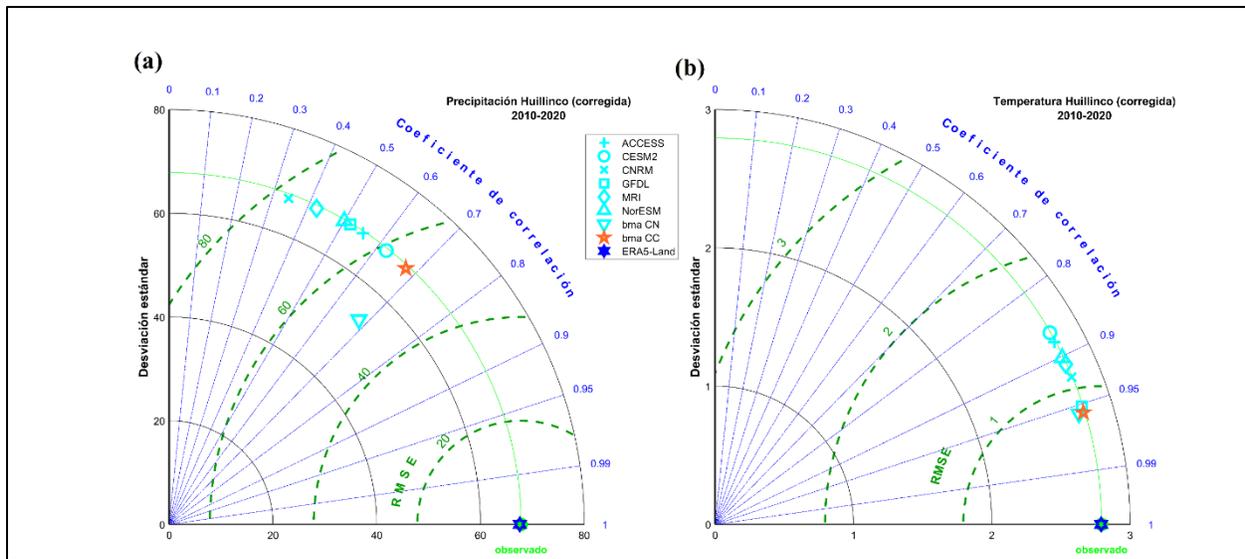


Figura 4. Diagrama de Taylor para precipitación (a) y la temperatura (b)

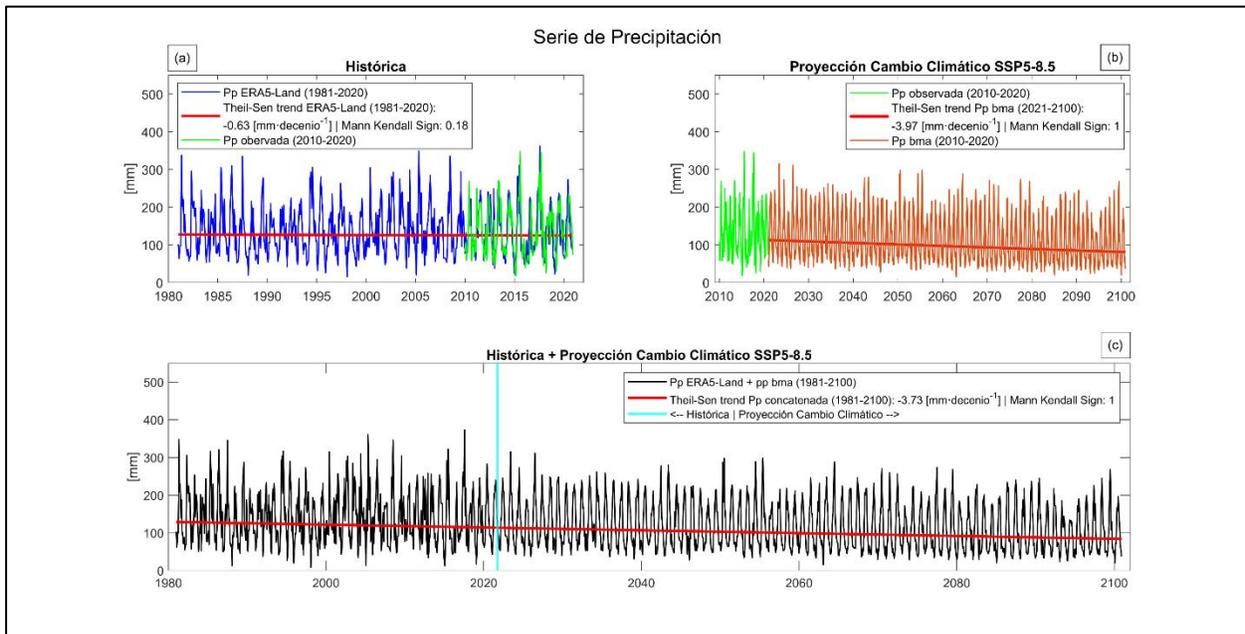
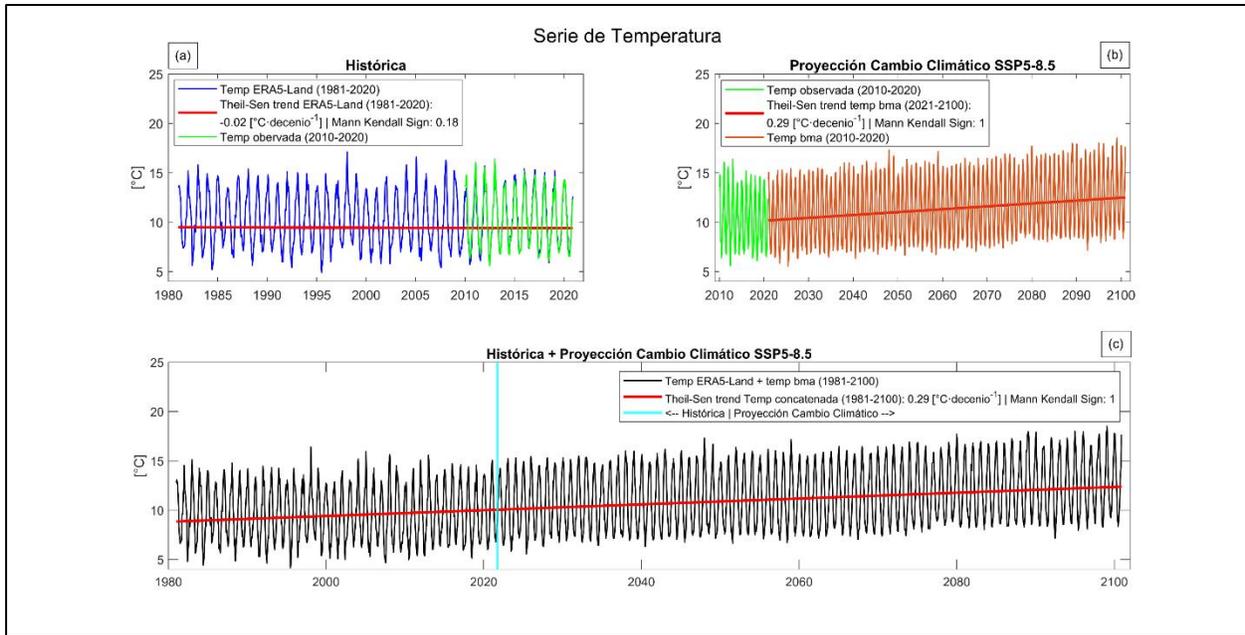
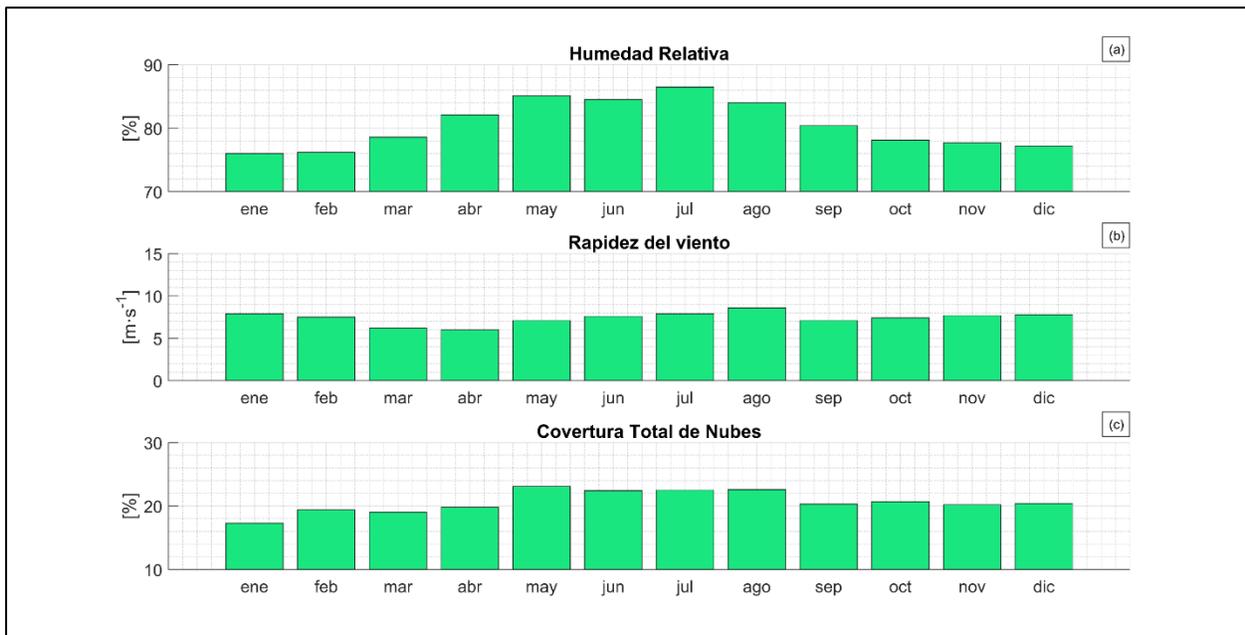


Figura 5. Precipitación resultante; histórica (a) y de la proyección BMA (b), integración precipitación histórica y proyectada (c)



**Figura 6.** Temperatura resultante; histórica (a) y de la proyección BMA (b), integración temperatura histórica y proyectada (c)

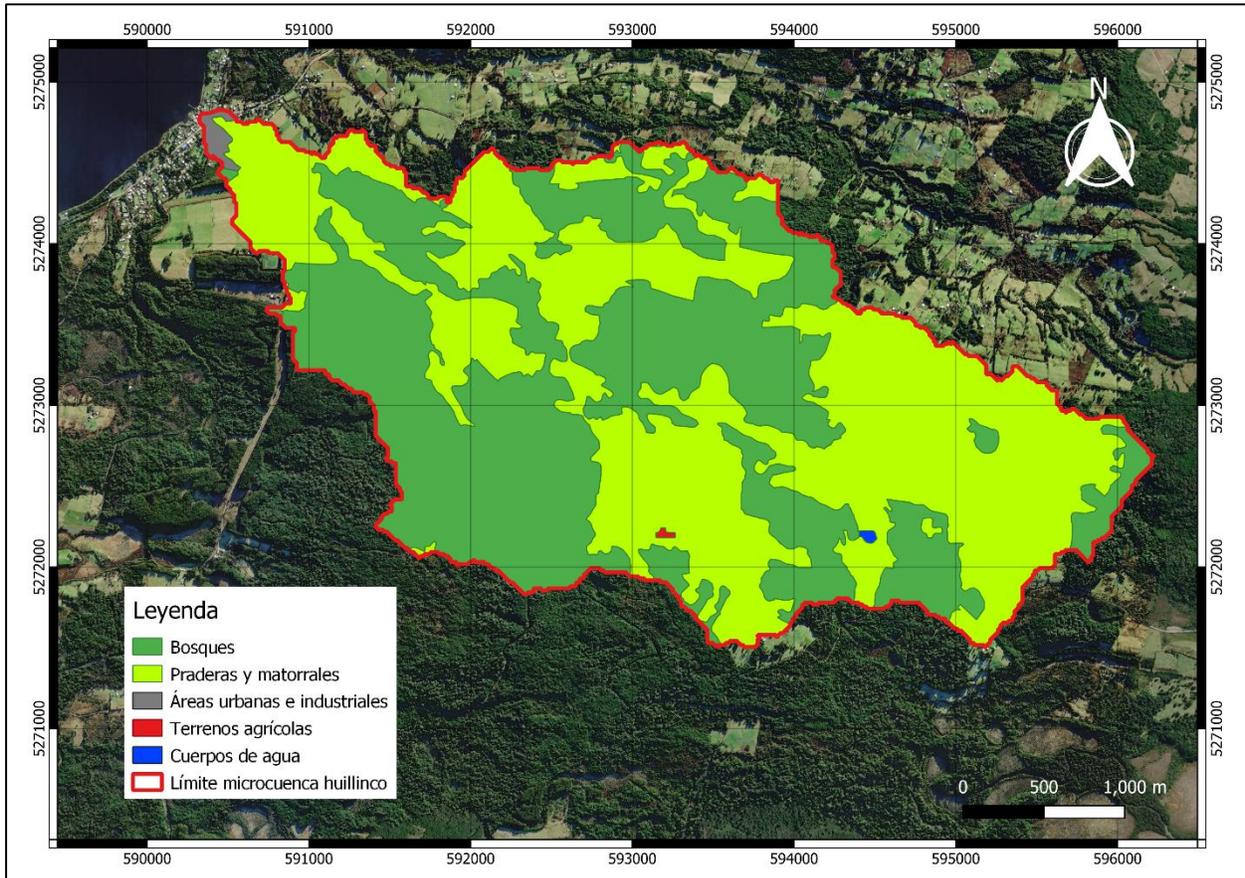


**Figura 7.** Variables meteorológicas promedio usadas en el modelo (2010-2020) para la simulación hidrológica

### Parametrización del Modelo

- *Clases de Uso de Suelo*

En base al catastro de uso de suelo de CONAF 2019 (CONAF 2021), se separó la zona de estudio en 5 clases de usos de suelos, los cuales se pueden observar en el **Cuadro 5** en términos de área, mientras la distribución espacial se puede observar en la **Figura 8**.



**Figura 8.** Clases de usos de suelo en la microcuenca Huillinco 2019

**Cuadro 5.** Clases de usos de suelo y sus superficies

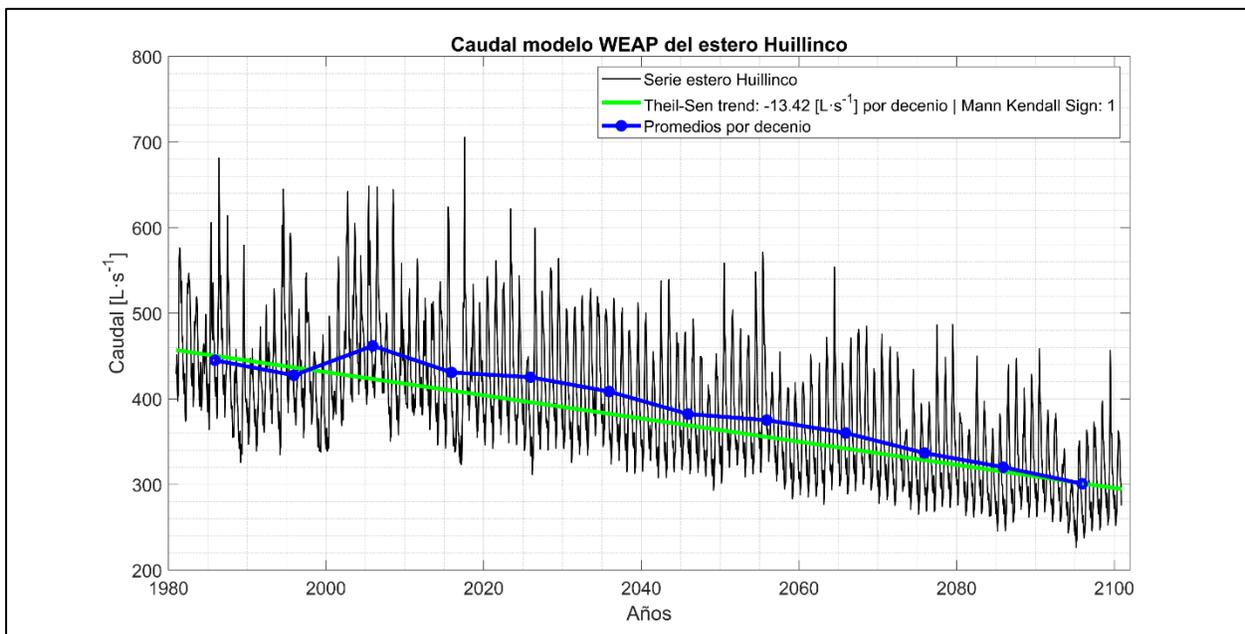
N°	Clasificación uso de suelo	Área [ha]
1	Bosques	528.78
2	Praderas y matorrales	565.54
3	Áreas urbanas e industriales	4.71
4	Terrenos agrícolas	0.5
5	Cuerpos de agua	0.64
<b>Total</b>		<b>1100.17</b>

## Consideraciones Antes y Durante la Simulación Hidrológica

Se consideró un periodo de prueba de 1950-1980 para el modelo hidrológico, donde se busca atenuar los efectos de las condiciones iniciales. Este periodo de tiempo no será incluido dentro de los resultados. El periodo analizado fue desde 1891 a 2100.

## RESULTADOS

En la **Figura 9** el caudal simulado marcó una tendencia de  $-13,42 \text{ L/s}$  por decenio. La varianza compartida ( $R^2$ ) entre la precipitación y el caudal simulado fue de 0,46, mientras que el  $R^2$  entre la temperatura y el caudal simulado fue de 0,51. En la misma figura se indica el promedio por cada decenio (1981-1990, ..., 2091-2100), donde el rango de estos valores fue desde  $461,92 \text{ L/s}$  (2001-2010) hasta  $300,85 \text{ L/s}$  (2091-2100).



**Figura 9.** Series de caudal simulado del estero Huillinco (negro), tendencia (verde) y promedios cada 10 años (azul)

En los gráficos de la **Figura 10** se desglosa el caudal simulado del estero Huillinco en sus correspondientes temporadas del año. En el verano austral (Dic-Feb; **Figura 10a**) el caudal simulado marca una tendencia de  $-11,8 \text{ L/s}$  por decenio, el  $R^2$  entre la precipitación y el caudal simulado de verano fue de 0,39, mientras que el  $R^2$  entre la temperatura y el caudal simulado de verano fue de 0,81. El promedio por decenio abarcó el rango desde  $422,88 \text{ L/s}$  (2001-2010) hasta  $275,95 \text{ L/s}$  (2091-2100).

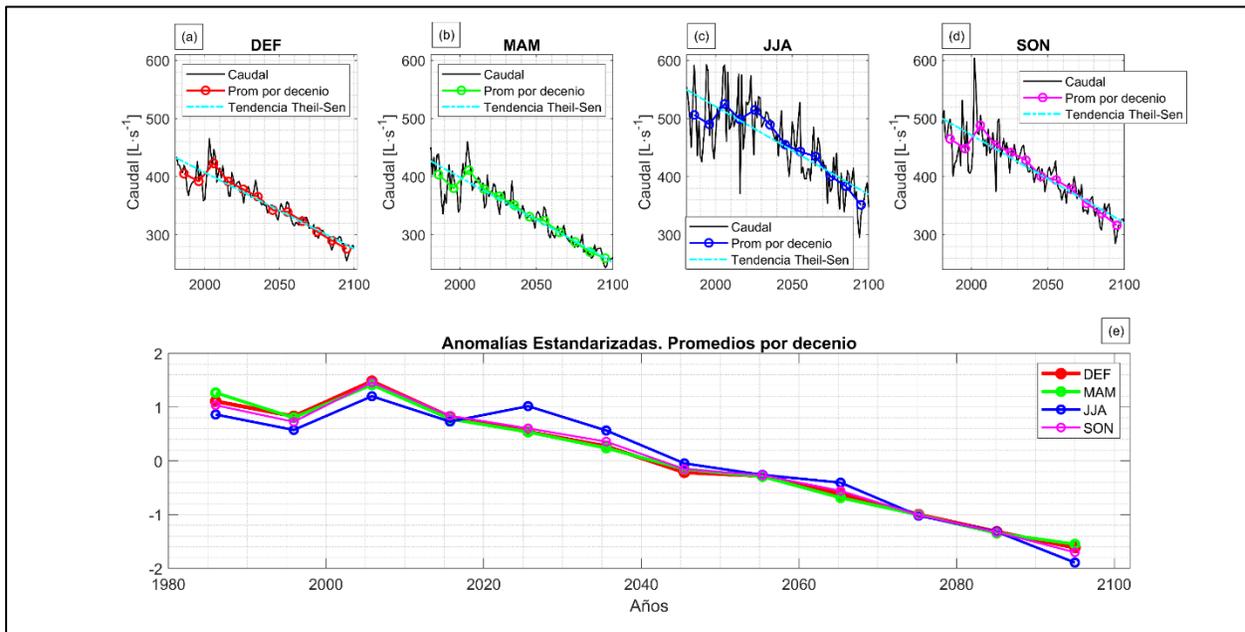
En el otoño austral (Mar-May; **Figura 10b**) el caudal simulado marca una tendencia de  $-13,16 \text{ L/s}$  por decenio, el  $R^2$  entre la precipitación y el caudal simulado de otoño fue de 0,58, mientras que el  $R^2$  entre la temperatura y el caudal simulado de otoño fue de 0,72. El promedio por decenio abarcó el rango desde  $411,24 \text{ L/s}$  (2001-2010) hasta  $259,78 \text{ L/s}$  (2091-2100).

En el invierno austral (Jun-Ago; **Figura 10c**) el caudal simulado marca una tendencia de  $-13,63 \text{ L/s}$  por decenio, el  $R^2$  entre la precipitación y el caudal simulado de invierno fue de 0,55, mientras que el  $R^2$  entre

la temperatura y el caudal simulado de invierno fue de 0,43. El promedio por decenio abarcó el rango desde 525,19 L/s (2001-2010) hasta 351,39 L/s (2091-2100).

En la primavera austral (Sep-Nov; **Figura 10d**) el caudal simulado marca una tendencia de -13,58 L/s por decenio, el  $R^2$  entre la precipitación y el caudal simulado de primavera fue de 0,68, mientras que el  $R^2$  entre la temperatura y el caudal simulado de primavera fue de 0,69. El promedio por decenio abarcó el rango desde 488,15 L/s (2001-2010) hasta 316,25 L/s (2091-2100).

En el gráfico inferior de la **Figura 10** se pueden ver las anomalías estandarizadas de los promedios por decenio de cada estación del año. Se observó, al igual que en la serie completa, que existe un descenso sostenido a medida que avanzan los decenios para todas las temporadas del año, donde en el decenio 2091-2100 está entre -1,4 y -1,6 desviaciones estándar con respecto a las medias de cada serie.



**Figura 10.** Caudal estacional y promedios por decenio (DEF a; MAM b; JJA c; SON d). Anomalías estandarizadas de los promedios por decenio (e).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La simulación indica una primera aproximación a lo que podría estar sucediendo o podría ocurrir en la microcuenca Huillinco, pero debería ser calibrada y validada con datos de caudal observado (SEI, 2015), datos que no existen de momento. Para ello existen opciones directas como instalar una estación fluviométrica en la desembocadura del estero Huillinco o realizar mediciones puntuales en un intervalo de tiempo semanal o mensual a lo largo de varios años (mínimo 3 años, para obtener una estimación de la variabilidad interanual). También se puede calibrar el caudal de forma indirecta con la instalación de estaciones de humedad del suelo, o más indirecto aun, usando una estación fluviométrica cercana, transformar de litros por segundo a milímetros, y comparar resultados, asumiendo que las características de las cuencas son similares.

Se debe tener precaución con la creación de las series de precipitación (**Figura 5**) y temperatura (**Figura 6**). En el periodo histórico, ni la precipitación ni la temperatura mostraron tendencias significativas (-0,63 mm/decenio y -0,02 °C/decenio, respectivamente). Por el contrario, las proyecciones de cambio climático

BMA sí muestran tendencias significativas (-3,97 mm/decenio y 0,29 °C/decenio, respectivamente), sugiriendo que las proyecciones de cambio climático no coinciden con lo que ocurre en la microcuenca Huillinco. Para profundizar este análisis debería aumentarse el número de modelos y simulaciones considerados, para estudiar de mejor manera cuanta su representatividad de la zona de estudio, ya que, por lo menos en el caso de precipitación no resultan muy certeros (**Figura 4**). También se podrían instalar estaciones meteorológicas en la microcuenca para calibrar con mayor exactitud los distintos modelos históricos y de proyección de cambio climático.

Sin embargo, por ahora, las simulaciones sin calibrar indican que el caudal del estero Huillinco muestra una tasa de cambio o pendiente negativa de -1,34 L/s por decenio, lo que de algún modo era esperable en el escenario del cambio climático SSP5-8.5.

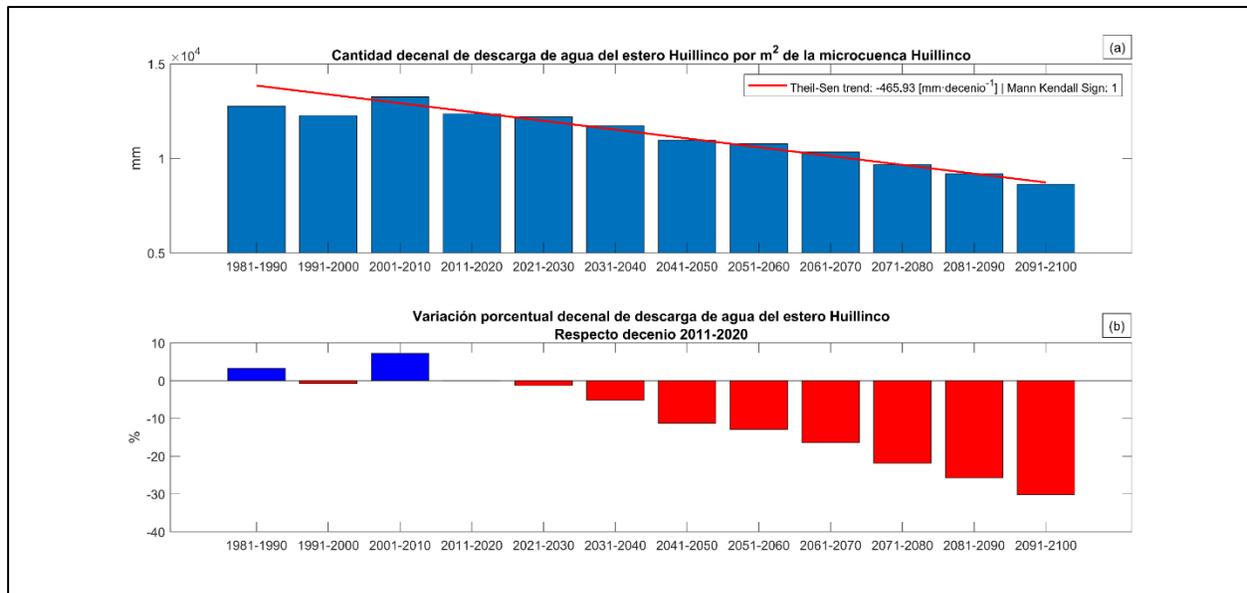
También es interesante ver el comportamiento del caudal simulado en cada época del año (**Figura 10e**) y observar que no existe una gran diferencia de las anomalías estandarizadas entre ellas.

Para tener una idea del total de agua descargada por el estero Huillinco por cada metro cuadrado de la microcuenca, en cada decenio, se transformó las unidades desde L/s a mm/mes usando la **Expresión (8)**.

$$Q \text{ mm/mes} = \frac{Q[L \cdot s^{-1}] \times 100 \times (N^{\circ} \text{ de días en el mes}) \times 3600 \times 24}{\text{Área cuenca [m}^2\text{]}} \quad (8)$$

Los resultados en la **Figura 11a** muestran que desde 1981 a 2100 existe una tendencia de -463,93 mm/decenio, mientras que la **Figura 11b** muestra que para el decenio de 2091-2100 habrá un 30% menos de descarga de agua respecto del decenio 2011-2020, lo que da a entender que la disponibilidad hídrica por metro cuadrado tiene una tendencia progresiva a descender.

A pesar de la incertidumbre involucrada en el estudio, este se puede considerar como un interesante primer ejercicio para especular sobre el posible comportamiento hidrológico en la microcuenca Huillinco, y su posible evolución durante el siglo XXI, de manera de poder analizar o planificar a futuro ciertas medidas que puedan mitigar los efectos del cambio climático. Por ejemplo, ante el descenso sostenido del caudal evidenciado en la simulación, deberían reducirse prácticas que incrementan las pérdidas de caudal, como el incremento de cultivos forestales, deforestación o extracción del musgo *pompón* (Quintana-Ruedlinger, 2020). Comparando las climatologías 1981-2010 y 2071-2100, las proyecciones también prevén un aumento de temperatura del orden de 2,5°C para finales de siglo (en la proyección SSP5-8.5), comenzando desde 2011 hasta 2100; y una disminución de precipitaciones del 25,72%. Tales nuevas condiciones incrementarían la posibilidad de eventos de sequías, incendios forestales, aumento de la erosión, entre otros (aunque se debería investigar cada situación o proyección con más profundidad). Se debería complementar este estudio con proyecciones socioambientales, por ejemplo, de cambio de uso de suelo, buscando las opciones que mejor equilibren la mitigación del cambio climático y las actividades productivas de la población local.



**Figura 11.** Cantidad (a) y variación porcentual (b) de la cantidad de descarga decenal por metro cuadrado en la microcuenca Huillinco.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa Minagri: “Monitoreo de cuencas y otros ecosistemas forestales vinculados al consumo humano del agua en la zona centro sur de Chile” (Código 3041331211), por permitir y apoyar la elaboración de esta investigación. También agradecer al Dr. Jasper A. Vrugt, por el desarrollo de los algoritmos MODELAVG y DREAM (para aplicar el promedio bayesiano de modelos), el cual se puede obtener en el enlace: <https://faculty.sites.uci.edu/jasper/software/>.

## REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements. En FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bao, L., Gneiting, T., Grimit, E.P., Guttorp, P., & Raftery, A.E. (2010). Bias correction and bayesian model averaging for ensemble forecasts of surface wind direction. *Monthly Weather Review*, 138(5). <https://doi.org/10.1175/2009MWR3138.1>
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, & SEI, S. E. I. (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. En Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador, Ministerio del Ambiente de Ecuador y el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo de la Universidad de Cuenca, Ecuador. [https://cambioglobal.uc.cl/images/publicacionesextension/9\\_2009\\_Guia-para-la-modelacion-con-la-plataforma-WEAP\\_CCG-SEI.pdf](https://cambioglobal.uc.cl/images/publicacionesextension/9_2009_Guia-para-la-modelacion-con-la-plataforma-WEAP_CCG-SEI.pdf)
- Chervenkov, H., & Slavov, K. (2019). Theil–Sen estimator vs. Ordinary least squares — Trend analysis for selected ETCCDI climate indices. *Comptes Rendus de L’Academie Bulgare des Sciences*, 72(1). <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.01.06>

- CIREN. (2016).** DEM Alos Palsar Región de Los Lagos. En IDE (Infraestructura de Datos Geoespaciales), Chile. <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/resumen.page?uuid=%7BCA9D8240-F412-4167-8F3F-151B0A533E4B%7D>
- CONAF. (2021).** Cartografía temática del Cambio de Uso de la Tierra para la Región de Los Lagos periodo 2001-2019, Escala 1:30.000. Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile (SIMEF). [https://ide.minagri.gob.cl/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/%7BF8AE2DCFC-FB88-4760-82B7-B0F8D221EB4F%7D\\_100259\\_es](https://ide.minagri.gob.cl/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/%7BF8AE2DCFC-FB88-4760-82B7-B0F8D221EB4F%7D_100259_es)
- CR2, DGA, MAM, NOAA & DMC. (2022).** Explorador Climático [Precipitación Mensual]. <https://explorador.cr2.cl/>
- Danabasoglu, G., Lamarque, J. F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K. et al. (2020).** The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(2). <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
- Davie, T. (2008).** Fundamentals of Hydrology, Second Edition. En Management (Número 10).
- DGA. (2017).** Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf>
- DGA. (2021).** Nuevo Decreto de Escasez Hídrica para 3 Provincias de la Región de Los Lagos. <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=750>
- Duque-Yaguache, F. L., & Zambrano-Vázquez, F. R. (2015).** Modelación de la Oferta Hídrica en una Cuenca de Montaña Tropical en Función de su Cobertura Del Suelo (Vol. 7). <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2015-v7-1-08>
- Escenarios Hídricos 2030 Chile. (2018).** Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. <https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2020/06/radiografia-del-agua-1.pdf>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016).** Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Faidah, D. Y., Kuswanto, H., & Suhartono. (2019).** The comparison of Bayesian model averaging with gaussian and gamma components for probabilistic precipitation forecasting. AIP Conference Proceedings, 2192. <https://doi.org/10.1063/1.5139173>
- Fanta, S. S., Namara, W. G., & Yesuf, M. B. (2022).** Assessment of water supply and demand in Gilgel Gibe watershed, southwest Ethiopia. Sustainable Water Resources Management, 8(4), 104. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00684-3>
- Fernández-Alberti, S., Abarca-del-Río, R., Bornhardt, C., & Ávila, A. (2021).** Development and Validation of a Model to Evaluate the Water Resources of a Natural Protected Area as a Provider of Ecosystem Services in a Mountain Basin in Southern Chile. Frontiers in Earth Science, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.539905>
- Frêne, C., Villarroel, F., Rojas, R., Sanzana, J., González, J., Alarcón, D., Gómez, F. et al. (2022).** Escasez de agua en Chiloé: Red Participativa de Agua como solución para el sector rural. Revista de geografía Norte Grande, 82, 375–396. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000200375>
- Fustos, I., Abarca-del-Río, R., Artal, O., Alvial, F., & Sepúlveda, H. H. (2022).** Impact on discharge modelling using different spatial and temporal resolution scenarios in South of Chile. Journal of South American Earth Sciences, 115. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103727>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020).** The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology, 40(1). <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009).** Present-day South American climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>

- Glen, S. (2016).** Mann Kendall Trend Test: Definition, Running the Test - Statistics How To. StatisticsHowTo.com. <https://www.statisticshowto.com/mann-kendall-trend-test/>
- Harynuk, J. (2022).** Theil-Sen Regression with intercept. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71205-theil-sen-regression-with-intercept>
- Held, I. M., Guo, H., Adcroft, A., Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Krasting, J., Shevliakova, E. et al. (2019).** Structure and Performance of GFDL's CM4.0 Climate Model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(11). <https://doi.org/10.1029/2019MS001829>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J. et al. (2019).** ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present. En Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
- Hinne, M., Gronau, Q. F., van den Bergh, D., & Wagenmakers, E. J. (2020).** A Conceptual Introduction to Bayesian Model Averaging. Advances in Methods and Practices in Psychological Science, 3(2). <https://doi.org/10.1177/2515245919898657>
- Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., & Volinsky, C. T. (1999).** Bayesian model averaging: A tutorial. Statistical Science, 14(4). <https://doi.org/10.1214/ss/1009212519>
- Hormazábal, V., Vargas Rojas, V., Abarca, R., Little Cárdenas, C., Rivera, D., Carrasco, N., & Villalobos Volpi, E. (2021).** Simulación hidrológica del caudal del estero Batuco en la microcuenca agroforestal Batuco (Ránquil, Región del Ñuble, Chile) bajo condiciones climáticas presentes y futuras. Ciencia & Investigación Forestal, 27(2): 3–22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.546>
- Ibrahim, U. A., Dan'azumi, S., Bdiya, H. H., Bunu, Z., & Chiroma, M. J. (2022).** Comparison of WEAP and SWAT models for streamflow prediction in the Hadejia-Nguru Wetlands, Nigeria. Modeling Earth Systems and Environment, 8(4), 4997–5010. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01435-1>
- INE. (2017).** Aldeas Censo 2017. Geodatos abiertos. <https://www.ine.gob.cl/herramientas/portal-de-mapas/geodatos-abiertos>
- INFOR. (2021).** Análisis hidrológico comparativo para las cuencas Batuco y Huillinco: proyecciones, adaptación y manejo de cuenca en escenarios de cambio climático Parte 1: Recolección de datos microcuenca Huillinco.
- INIA, CEAZA & DMC. (2022).** Agrometeorología INIA [Temperatura mensual, Precipitación mensual, Humedad relativa, Velocidad del viento]. <https://agrometeorologia.cl/>
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020).** Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. Nature Communications, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006).** World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Marticorena, J. (2020).** Consumo de Agua Promedio por Persona en Chile Supera la Media de Europa, aunque está muy por debajo de la de Estados Unidos. El Mercurio. [https://www.litoralpress.cl/paginaconsultas/Servicios\\_NClipSitio/Get\\_Imagen\\_Pagina.aspx?LPKey=LVISR6H4DB52E74KGLFSSNDHZAN3KR7H7FG7HH54BLBGYWWMBWKQ](https://www.litoralpress.cl/paginaconsultas/Servicios_NClipSitio/Get_Imagen_Pagina.aspx?LPKey=LVISR6H4DB52E74KGLFSSNDHZAN3KR7H7FG7HH54BLBGYWWMBWKQ)
- Massoud, E. C., Lee, H., Gibson, P. B., Loikith, P., & Waliser, D. E. (2020).** Bayesian model averaging of climate model projections constrained by precipitation observations over the contiguous United States. Journal of Hydrometeorology, 21(10). <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0258.1>
- Mena-Pardo, D. I. (2009).** Análisis de Impactos del Cambio Climático en la Cuenca Andina del Río Teno, Usando el Modelo Weap [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103570>
- Montes, C. (2021).** Balance Hídrico Nacional revela dramática situación: proyecta escasez de agua de hasta 50% y alza de temperatura de hasta 2,5°C. La tercera. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/balance-hidrico->

*nacional-revela-dramatica-situacion-proyecta-escasez-de-agua-de-hasta-50-y-alza-de-temperatura-de-hasta-25c/JOPGLFFSRRGTVNZNQNM73CGS6I/*

- MOP. (2014).** Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/CUH5690.pdf>
- Muñoz Sabater, J. (2019).** ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb3>
- Muñoz Sabater, J. (2021).** ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb3>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R. et al. (2016).** The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Orrego, R., Abarca-del-Río, R., Ávila, A., & Morales, L. (2016).** Enhanced mesoscale climate projections in TAR and AR5 IPCC scenarios: a case study in a Mediterranean climate (Araucanía Region, south central Chile). *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3157-6>
- Quintana-Ruedinger, G. (2020).** Chiloé está perdiendo sus más importantes reservorios de agua dulce . *Diario UCh*.
- Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005).** Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5). <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
- Reichle, R.H., & Koster, R.D. (2004).** Bias reduction in short records of satellite soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 31(19). <https://doi.org/10.1029/2004GL020938>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N. et al. (2017).** The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Río-La Mura, P.A. del. (2015).** Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca de Pangal en Pangal [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/135204>
- Rochford, P. (2022).** PeterRochford/SkillMetricsToolbox (1.8.1). <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox>
- SEI. (2015).** WEAP Water Evaluation and Planning System User Guide. En *Stockholm Environment Institute*. [https://www.weap21.org/downloads/WEAP\\_User\\_Guide.pdf](https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf)
- Seland, Ø., Bentsen, M., Olivie, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Graff, L. S., Debernard, J. B. et al. (2020).** Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development*, 13(12). <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6165-2020>
- Singh, A. (2020).** CDF matching bias correction method in MATLAB (1.0). <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/78784-cdf-matching-bias-correction-method-in-matlab>
- Singh, A., Gaurav, K., Meena, G. K., & Kumar, S. (2020).** Estimation of soil moisture applying modified Dubois model to Sentinel-1; A regional study from Central India. *Remote Sensing*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/rs12142266>
- Sloughter, J. M. L., Raftery, A. E., Gneiting, T., & Fraley, C. (2007).** Probabilistic quantitative precipitation forecasting using bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 135(9). <https://doi.org/10.1175/MWR3441.1>
- Taylor, K. E. (2001).** Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D7). <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Thorvaldsen, S. (2022).** Cumulative Mann-Kendall trend test. MATLAB Central File Exchange.

- Trenberth, K. E. (2011).** Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2). <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C. et al. (2011).** The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vargas, X. (2012).** Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5691>
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J. et al. (2019).** Evaluation of CMIP6 DECK Experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7). <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>
- Vrugt, J. A. (2016).** Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation. *Environmental Modelling and Software*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.013>
- Vrugt, J. A. (2018).** MODELAVG: A MATLAB Toolbox for Postprocessing of Model Ensembles. <https://faculty.sites.uci.edu/jasper/software/>
- Wilks, D. (2005).** *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H. et al. (2019).** The meteorological research institute Earth system model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(5). <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., Stevens, L. et al. (2020).** The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1071/ES19035>

ANEXO 1

Extracción de Información Meteorológica *In Situ* de la Zona de Estudio

**Precipitación**

Para construir el campo de isoyetas, o líneas de igual precipitación, (**Figura A1.1**), se escogió estaciones que tuvieran registro desde enero del 2012 hasta diciembre del 2018. Estas fueron las estaciones N° 1, 4, 5, 7, 10, 11, 14 y 16 del Cuadro 1. Luego a partir de la **Expresión A1.1** se calculó la precipitación anual de cada estación seleccionada, y con la **Expresión A1.2** se calculó la precipitación anual normal, que es el promedio de las precipitaciones anuales de cada estación seleccionada:

$$P_{(a,e)} = \sum_{m=1}^{12} P_{(m,a,e)}(m) \quad (\text{A1.1})$$

Donde:

$P_{(a,e)}$  = precipitaciones acumuladas en un año a en una estación e

$P_{(m,a,e)}$  = precipitación mensual en un mes m, en un año a y una estación e.

$$P_{(pa,e)} = \frac{\sum_{a=1}^n P_{(a,e)}(a)}{n} \quad (\text{A1.2})$$

Donde:

$P_{(pa,e)}$  = precipitación anual normal en una estación e

$P_{(a,e)}$  = precipitación anual en el año a y estación e

n = número de años (que sería desde el 2012 hasta el 2018)

Después de calcular la precipitación anual normal en cada estación meteorológica, se usó un sistema de información geográfica (SIG)<sup>1</sup> para generar un mapa interpolado de las precipitaciones anuales normales de las estaciones meteorológicas, dentro de la cuenca de la Isla de Chiloé y circundantes (**Figura A1.1**). Posteriormente se calculó el promedio de los píxeles que cubrían la microcuenca Huillinco, para obtener un valor representativo de la precipitación anual normal. Este valor fue de 1.610 mm.

<sup>1</sup> Qgis

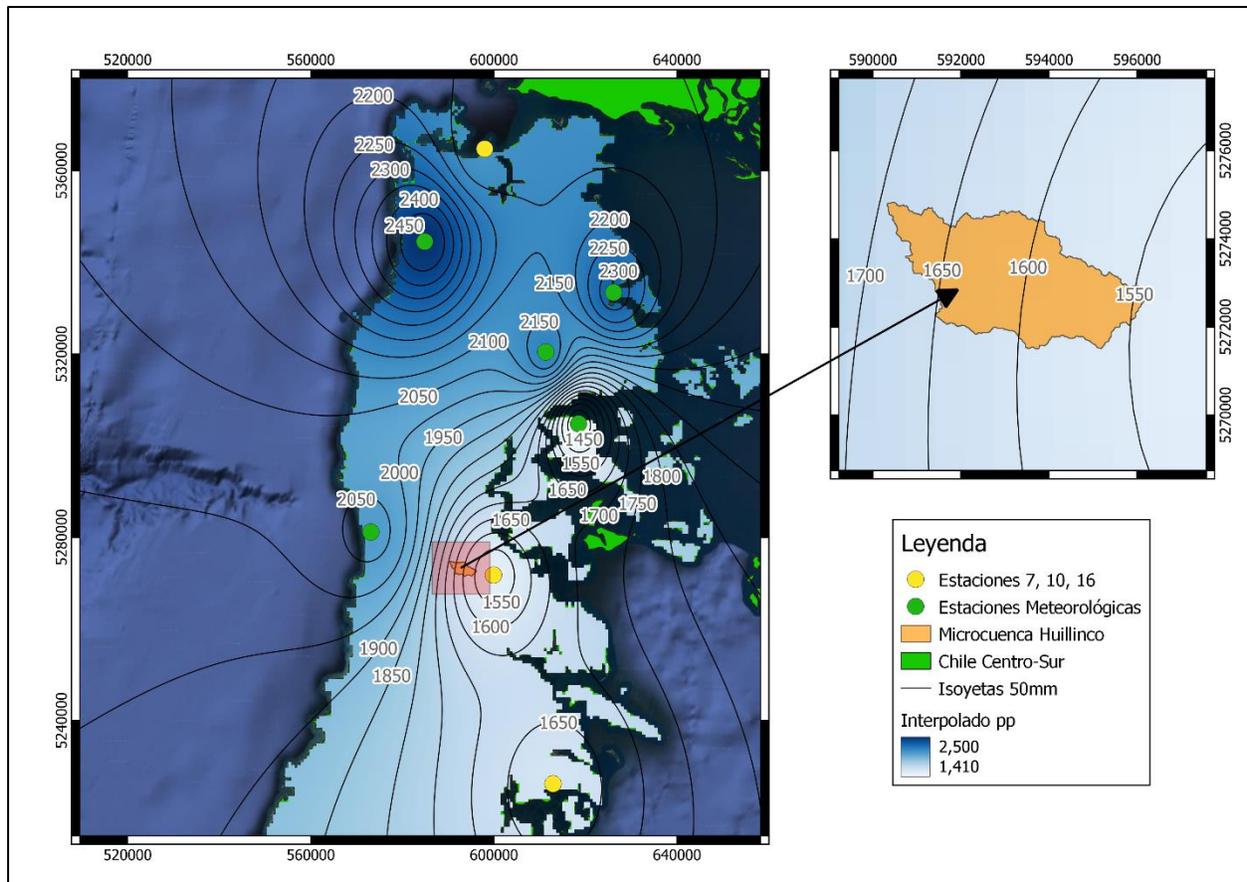


Figura A1. 1. Interpolación de la precipitación anual (por el método de isoyetas) en la Isla Grande de Chiloé

Para reconstruir la serie de precipitaciones para la microcuenca Huillinco se escogió la estación N° 7, 10 y 16 (**Cuadro 1**), ya que estas estaciones combinadas poseían datos desde marzo del 1992 hasta octubre del 2021.

A partir de la **Expresión (A1.3)** se calculó la precipitación a escala mensual en la microcuenca Huillinco:

$$Ph_{(m,a)} = Pc_{(m,a)} \times \frac{Ph_{(pa)}}{Pe_{(pa)}} \quad (\text{A1.3})$$

Donde:

- Ph<sub>(m,a)</sub> = Precipitación en la microcuenca Huillinco (zona de estudio) en el mes m y en el año a;
- Pe<sub>(m,a)</sub> = Precipitación en el mes m y el año a, de las estaciones de referencia (N° 7, 10 y 16; del **Cuadro 1**);
- Ph<sub>(pa)</sub> = Precipitación anual normal representativa (1.610 mm);
- Pe<sub>(pa)</sub> = Precipitación anual normal de las estaciones de referencia (N° 7, 16 y 16; del **Cuadro 1**).

### Temperatura, Humedad Relativa y Rapidez del Viento.

Para construir el campo de isotermas (líneas de igual temperatura), isóhumas (líneas de igual humedad relativa), isotacas (líneas de igual rapidez del viento), se seleccionó a las estaciones que tuvieran registro desde enero del 2010 hasta diciembre del 2020, debido al registro más pobre de estas variables y el

número menor de ellas que las registran en comparación de la precipitación<sup>1</sup>. En el caso de las isotermas e isóhumas se usó las estaciones 1, 2, 3, 6, 7, 8 y 9 (**Cuadro 1**), y para las isotacas las estaciones N° 1, 3, 6, 7, 8 y 9 (**Cuadro 1**).

A diferencia de la precipitación, donde se calculó un valor de precipitación anual normal representativo para cada estación (ecuaciones **A1.1**, **A1.2** y **A1.3**), para las otras variables meteorológicas se usó los valores mensuales del 2020 como valores representativos para cada estación. Luego con la ayuda de un sistema de información geográfica (SIG), se realizó un proceso similar al de la **Figura A1.1**, solo que ahora se obtuvo 12 valores representativos para cada variable (Figuras no mostradas).

Para reconstruir las series de temperatura, humedad relativa, rapidez del viento (en conjunto representadas por X), para la microcuenca Huillinco, se escogió la estación N° 1 y 7, ya que estas estaciones combinadas para la temperatura y la humedad relativa, poseían datos desde octubre del 2009 hasta octubre del 2021, mientras que para la rapidez del viento poseían datos desde mayo del 2010 hasta octubre del 2021.

Luego, a partir de la **Expresión (A1.4)** se calculó las series de cada variable a escala mensual en la microcuenca Huillinco:

$$Xh_{(m,a)} = Xn_{(m,a)} \times \frac{XCh_{(m)}}{XCn_{(m)}} \quad (\mathbf{A1.4})$$

Donde:

$Xh_{(m,a)}$  = Variable meteorológica X en la microcuenca Huillinco en el mes m y el año a

$Xe_{(m,a)}$  = Variable meteorológica X en el mes m y el año a, de la estaciones de referencia (N° 1 y 7; **Cuadro 1**)

$XCh_{(m)}$  = Variable meteorológica X representativo (2020) en el mes m

$XCe_{(pa)}$  = Variable meteorológica X representativo (2020) de la estación de referencia (N° 1 y 7; **Cuadro 1**) en el mes m.

---

<sup>1</sup> Por ejemplo, para la temperatura, cuya variabilidad espacial es más homogénea que la de la precipitación, no existiría la necesidad de tantas estaciones de monitoreo, como en el caso de la precipitación. Esto se puede observar indirectamente en la Figura 1 de [Garreaud et al. \(2009\)](#).

## ANEXO 2

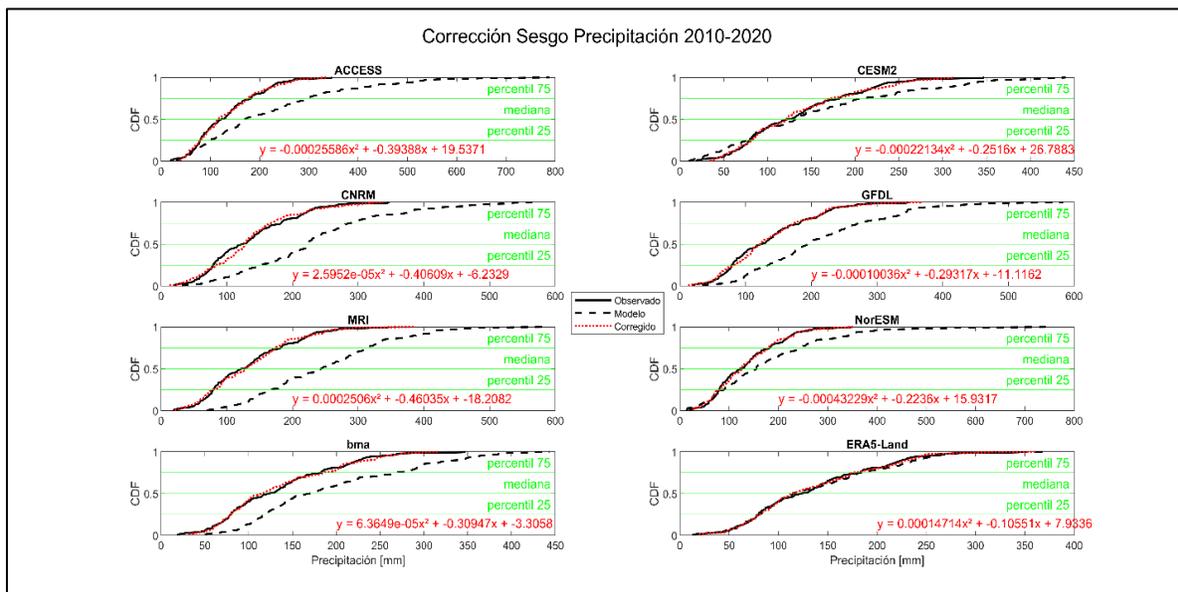
### Corrección de Sesgo

Los productos de precipitación y de temperatura de los modelos CMIP6 (histórico y SSP5-8.5) se interpolaron a un tamaño de grilla común de 1.0° (360 longitud x 180 latitud) de sus tamaños de grillas originales (**Cuadro 1**).

Luego se utilizó el periodo común de 2010-2020, para corregir el sesgo de la precipitación y la temperatura, en base a las series extraídas del **Anexo 1**, y que se pueden observar de las **Figuras 5 y 6**, respectivamente (color verde).

Las **Figuras A2.1 y A2.2** muestran la corrección de sesgo mediante la Función de Distribución Acumulada (CDF), para cada modelo descrito en el **Cuadro 3**, las series BMA (creada en base a **Cuadro 4** y mostradas en las **Figuras 5 y 6**) y el producto climatológico ERA5-Land (**Cuadro 2**). Esta corrección se realizó a través del algoritmo de [Singh \(2020\)](#). (Se puede obtener más información en [Singh et al., 2020](#) y [Reichle & Koster, 2004](#)).

En el **Cuadro A2.1** se presenta el sesgo antes y después de la corrección de cada modelo. En las **Figuras A2.3 y A2.4** se puede ver la transición de las series antes y después de la corrección de sesgo, para la precipitación y temperatura respectivamente (periodo 2010-2020). Posteriormente esta corrección de sesgo se extrapoló a los periodos de proyección climática (2021-2100).



**Figura A2.1.** Corrección de sesgo de las simulaciones descritas en el Cuadro 3, del producto BMA (Cuadro 4) y de ERA5-land (Cuadro 2); para las precipitaciones.

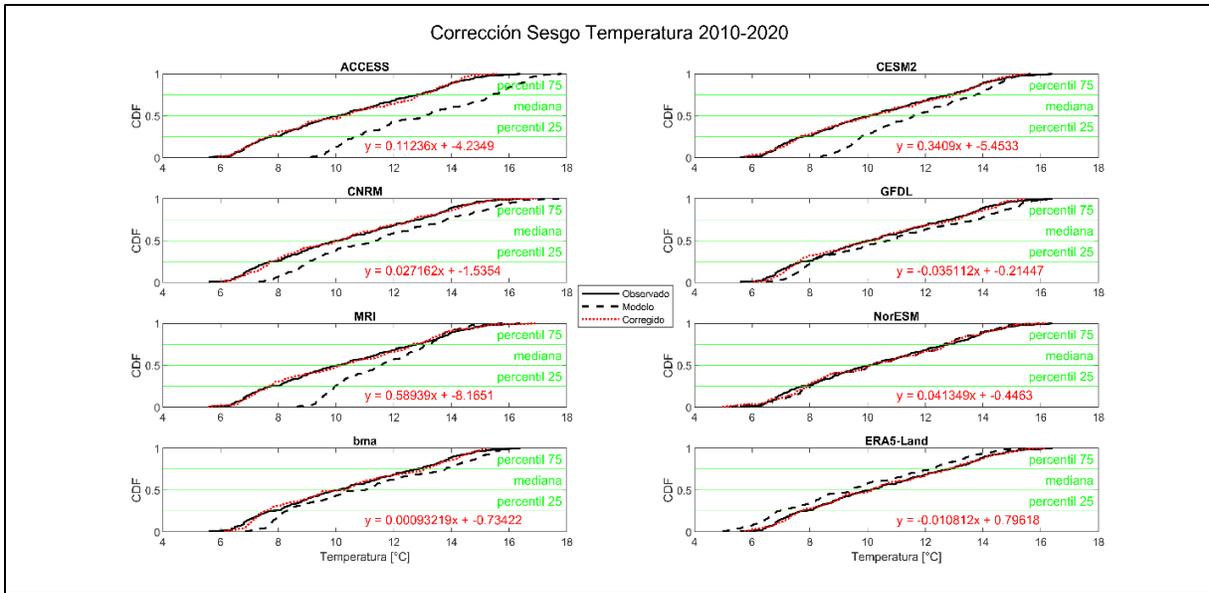


Figura A2.2. Corrección de sesgo de las simulaciones descritas en el Cuadro 3, del producto BMA (Cuadro 4) y de ERA5-land (Cuadro 2); para las temperaturas

Cuadro A2.1. Sesgo antes y después de la corrección

N°	Modelos	Precipitación		Temperatura	
		Sesgo antes [mm]	Sesgo después [mm] × 10 <sup>-12</sup>	Sesgo antes [°C]	Sesgo después [°C] × 10 <sup>-13</sup>
1	ACCESS-ESM1-5	84.33	0.2374	2.76	-0.0902
2	CESM2-WACCM	19.26	0.0398	1.43	-0.0982
3	CNRM-CM6-1	99.22	-0.0721	1.22	-0.0202
4	GFDL-ESM4	79.28	-0.0764	0.60	-0.0027
5	MRI-ESM2-0	114.75	0.0474	1.30	0.2900
6	Nor-ESM1-M	43.99	0	0.02	0.0148
7	BMA	60.55	0.0237	0.72	-0.0114
8	ERA5-Land	3.00	-0.0043	-0.69	-0.0040

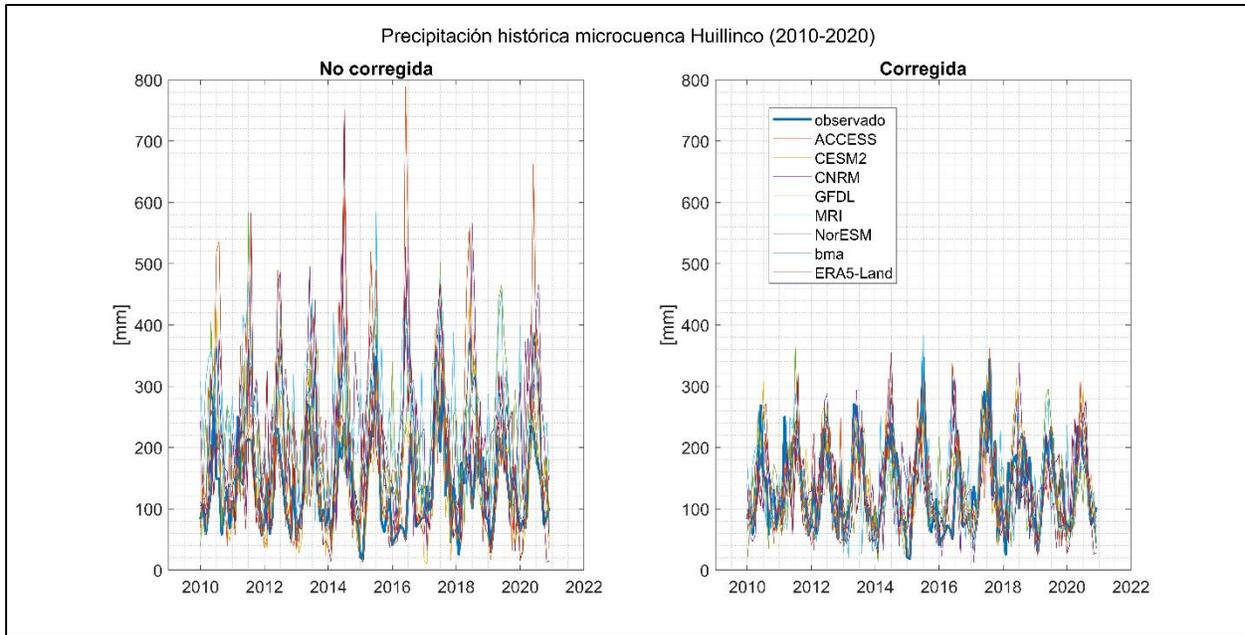


Figura A2.3. Series de precipitación antes (izquierda) y después (derecha) de ser corregidas

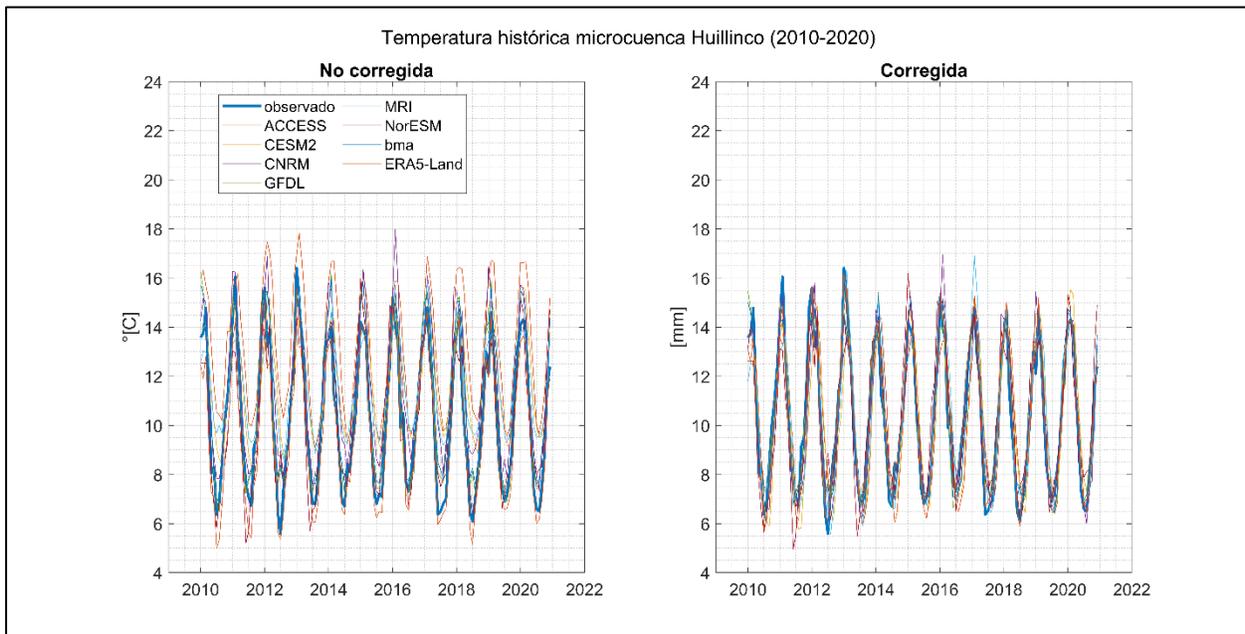


Figura A2.4. Series de temperatura antes (izquierda) y después (derecha) de ser corregidas





ARTÍCULO

**Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus greggii* var. *australis* de una plantación en Hidalgo, México**

Cristina Lizeth Sigala Cerros<sup>1</sup>, Alfonso Suárez Islas<sup>2</sup>, José Ángel Prieto Ruíz<sup>1</sup>, Artemio Carrillo Parra<sup>1</sup>, Pedro Antonio Domínguez-Calleros<sup>1</sup> y José Rodolfo Goche-Télles<sup>1\*</sup>.

<sup>1</sup> Ingeniero Forestal. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México. [jgoche@ujed.mx](mailto:jgoche@ujed.mx)

<sup>2</sup> Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Profesor. Tulancingo, Hidalgo México.

\* Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.585>

Recibido: 03.02.2023; Aceptado: 01.03.2023

**RESUMEN**

La madera proveniente de plantaciones es diferente en sus propiedades físico-mecánicas a la obtenida de rodales naturales. El objetivo del presente trabajo es determinar la densidad básica, ancho de anillos, MOE, ELP, MOR y dureza Janka en la madera de *Pinus greggii* var. *australis* proveniente de una plantación de 19 años del estado de Hidalgo, México. Los cilindros de madera se colectaron a 1,30 m de altura, mediante el taladro de Pressler en 16 árboles, ocho del borde y ocho del centro de la plantación. La densidad básica y el ancho de anillos se determinaron en cada uno de los anillos de crecimiento. Las propiedades mecánicas se obtuvieron utilizando la densidad básica como variable independiente mediante modelos estadísticos establecidos para tal fin. Los resultados muestran diferencias entre la densidad básica de los árboles provenientes del borde con los del centro ( $p < 0,0001$ ), mientras que el ancho de anillos no presentó diferencias estadísticas significativas. La madera presentó una densidad básica promedio de  $0,47 \text{ g/cm}^3$ , clasificándose como ligera. Los resultados de las propiedades mecánicas clasifican a la madera como baja en MOE, ELP y MOR para compresión paralela, ELP y MOR en flexión estática y dureza Janka, mientras que en MOE para flexión estática se considera como media. La madera de esta plantación no es adecuada para construcción, debido a su densidad básica ligera y a los bajos valores en resistencia y dureza.

**Palabras clave:** *Pinus greggii* var. *australis*. Anillos de crecimiento. Densidad básica. Flexión estática. Madera juvenil.

**SUMMARY**

Wood from plantations is different in its physical-mechanical properties from that obtained from natural stands. The objective of this work is to determine the basic density, ring width, MOE, ELP, MOR and Janka hardness in *Pinus greggii* var. *australis* wood from a 19-year-old plantation in the state of Hidalgo. The wooden cylinders were collected 1.30 m high, using a Pressler drill in 16 trees, eight from the edge and eight from the center of the plantation. The basic density and the width of the rings were determined in each of the growth rings. The mechanical properties were gotten using the basic density as an independent variable, with statistical models established for this purpose. The results show differences between the basic density of the trees from the edge and those from the center ( $p < 0.0001$ ), while the width of the rings did not show statistically significant differences. The wood presented an average basic density of  $0.47 \text{ g/cm}^3$ , classified as light. The results of the mechanical properties allow the wood to be classified as low in MOE, ELP and MOR for parallel compression, ELP and MOR in static bending and Janka hardness, while in MOE for static bending it is considered as medium. The wood from this plantation is not considered suitable for construction, due to the light basic density and the low values in resistance and hardness.

**Key words:** *Pinus greggii* var. *australis*. Growth rings. Basic density. Static bending. Juvenile wood.

## INTRODUCCIÓN

México cuenta con 230.341 ha de plantaciones forestales comerciales, de las cuales el 73 % de la superficie se estableció en el período 2000-2019, con el uso de nueve especies maderables, entre ellas *Pinus greggii* Engelm. y sus variedades (CONAFOR, 2020). El estado de Hidalgo cuenta con 4.589 ha plantadas, lo que representa el 1,99 % del total de plantaciones forestales en México (SEMARNAT, 2020).

*Pinus greggii* var. *australis* es nativo de México, se distribuye en los estados de Querétaro, Hidalgo, San Luis Potosí, Veracruz y Puebla, en altitudes de 1.400 a 2.100 msnm (Donahue y López-Upton, 1999). Se considera como buena alternativa para reforestar sitios degradados (López-Upton *et al.*, 2004), debido a su adaptabilidad, manifestada en sus altas tasas de supervivencia y buenos incrementos en altura y diámetro (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2013). En su área de distribución es uno de los árboles con mayor valor económico, su madera se usa en la industria del aserrío principalmente, y localmente se emplea para obtener postes para cercas y leña para combustible (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

La densidad básica es la propiedad más utilizada para estimar las propiedades mecánicas de la madera (Nowak *et al.*, 2021) y es uno de los parámetros clave en la evaluación de la calidad de la misma (González *et al.*, 2016). El ancho de anillos de crecimiento está relacionado directamente con la densidad básica (Gogoi *et al.*, 2020), aspecto que tiene relación con el manejo de los bosques y la fabricación de productos derivados de la madera (Hara *et al.*, 2018), por lo que es un indicador visual de la calidad de la madera aserrada (McLean, 2019).

Existe escasa información respecto a las propiedades físico-mecánicas de *Pinus greggii* y sus variedades, tanto de madera proveniente de rodales naturales como de plantaciones. De tal manera que el objetivo de esta investigación es determinar la densidad básica, ancho de anillos, MOE, ELP, MOR y dureza Janka en la madera de *Pinus greggii* var. *australis* proveniente de una plantación de 19 años del estado de Hidalgo, México.

## MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se realizó en una plantación localizada en el municipio de Acaxochitlán, estado de Hidalgo, México, ubicada entre las coordenadas 20° 09' 52" LN y 98° 13' 31" LO, a una altitud de 2200 msnm (Figura 1). La plantación se estableció en julio de 1999, con plantas de vivero de 10 meses de edad producidas con semilla proveniente de la localidad de El Madroño, Jalpan, Querétaro, México, procedencia bien definida que cuenta con rodales de excelente calidad, con buena conformación del fuste y abundante regeneración natural (Musalem & Martínez, 2003).

El sitio de la plantación presenta una pendiente promedio de 2 %, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw), con una temperatura media anual de 16 °C y una precipitación media anual de 800 a 1.000 mm. De acuerdo con Acevedo-Sandoval *et al.* (2010), el suelo es alisol cutánico úmbico, caracterizado por un horizonte superficial delgado, con contenidos de materia orgánica promedio de 6,06% en los 20 cm superiores.

La plantación se estableció en una superficie de 600 m<sup>2</sup>, su distribución fue en marco real, con un espaciamiento inicial de 1 x 1 m, el cual se ajustó al tercer año (2003) a 2 x 1 m (5.000 árboles/ha) mediante la corta de los individuos en una de cada dos hileras. Este ajuste de espaciamiento se hizo para minimizar efectos de competencia y favorecer el crecimiento de los árboles.

La densidad básica y el ancho de anillos de crecimiento se obtuvo a partir de 16 árboles elegidos al azar, en dos condiciones de plantación, ocho árboles ubicados en el borde y ocho al interior. De cada árbol se obtuvo un cilindro de madera por medio del taladro de Pressler de 5 mm de diámetro, a una altura de 1,30 m. Los cilindros de madera se dividieron por anillo de crecimiento, posteriormente, se agruparon en tres secciones (interna, media y externa). En cada anillo se midió su ancho con un piedemetro digital, marca Mitutoyo® en estado saturado, posteriormente se pesaron en una balanza analítica marca Velab®

con aproximación de diezmilésimas de gramo. Los anillos de crecimiento se colocaron en cajas de Petri dentro de una estufa de secado marca Grieve® modelo LW -201C a una temperatura de  $100 \pm 2$  °C hasta obtener un peso constante (peso anhidro), el cual se alcanzó a las 48 horas, los datos se capturaron en el paquete estadístico Excel® para su posterior procesamiento.

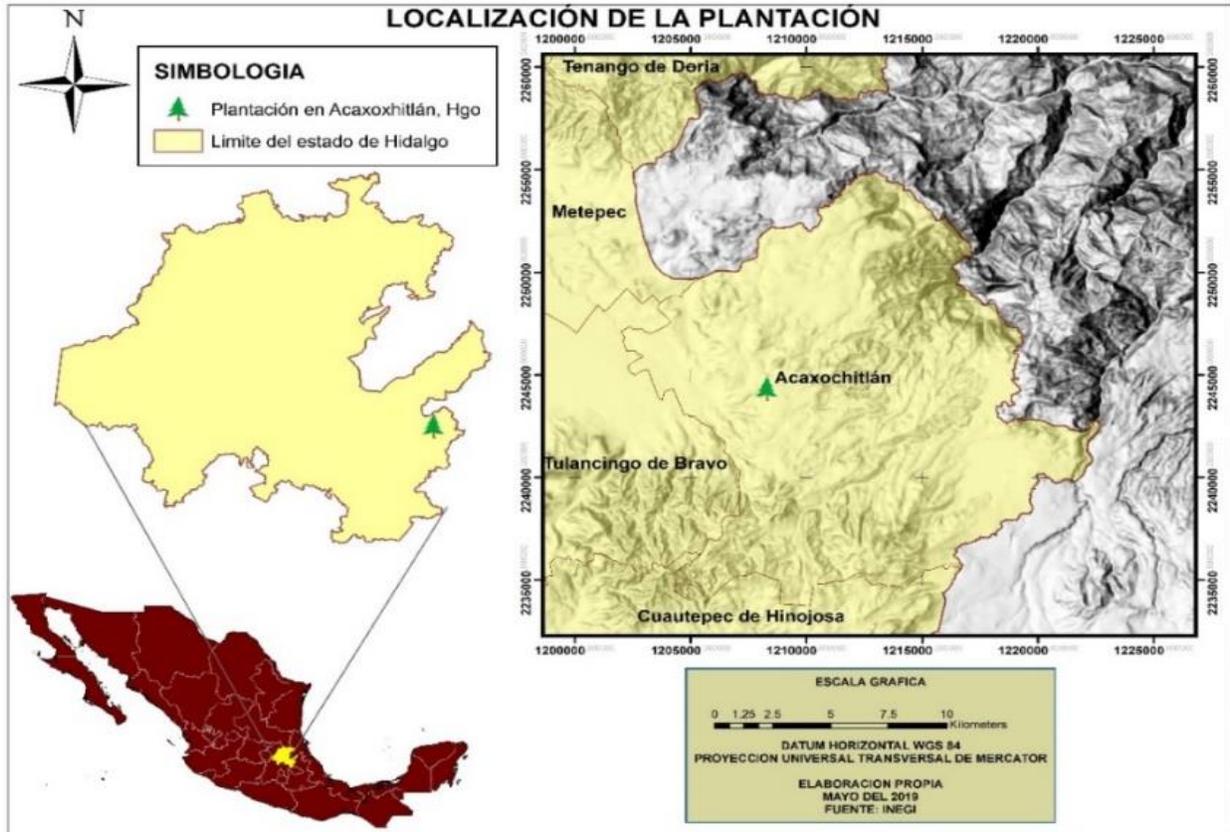


Figura 1. Localización de la plantación de *Pinus greggii* var. *australis*

La densidad básica de cada muestra de madera se obtuvo con el método de núcleos de incremento establecido en la norma ASTM D2395-17, con los valores de volumen saturado y peso anhidro, aplicando la fórmula (1) (ASTM, 2017).

$$DB = \frac{P_o}{V_s} \quad (1)$$

Donde:

DB = Densidad básica (g/cm<sup>3</sup>)

P<sub>o</sub> = Peso anhidro

V<sub>s</sub> = Volumen saturado

La densidad básica se clasificó con la tabla presentada por Sotomayor (2005), la cual se basa en los valores promedio de las especies. Las propiedades mecánicas se determinaron con la fórmula (2).

$$R = A\rho^b \quad (2)$$

Donde:

$R$  = La propiedad mecánica  
 $\rho$  = Es la densidad básica ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $A$  y  $b$  = Parámetros estimados

Los valores de los parámetros reportados por Torres-Ceballos (2020), que fueron utilizados en la estimación de las propiedades mecánicas de *Pinus greggii* var. *australis*, se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Valores de los parámetros para determinar las propiedades mecánicas

Propiedad mecánica		Parámetros estimados	
		A	b
Flexión estática	Módulo de Elasticidad (MOE)	191.045	1,02
	Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad (ELP)	792	1,18
	Módulo de Ruptura (MOR)	1.507	1,27
Compresión paralela	Módulo de Elasticidad (MOE)	209.127	1,14
	Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad (ELP)	460	1,27
	Módulo de Ruptura (MOR)	696	1,36
Dureza Janka	Cara Lateral (L)	1.248	1,94
	Cara Transversal (T)	1.225	1,76

Los resultados se analizaron mediante un análisis de regresión lineal múltiple, considerando como variables independientes (X) la ubicación de los árboles en la plantación, el árbol y la ubicación radial del anillo de crecimiento, mientras que la densidad básica, ancho de anillos de crecimiento y contenido de humedad de los cilindros de madera, fueron las variables dependientes (Y). El análisis de varianza se obtuvo mediante el procedimiento PROC GLM (modelo lineal estandarizado) del sistema SAS® (SAS Institute Inc, 2002). Dado que se encontraron diferencias estadísticas significativas dentro de las variables analizadas, se realizaron pruebas de medias de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Adicional a lo anterior, se efectuaron correlaciones ( $p < 0,05$ ) para mostrar la relación de la densidad básica con el ancho de anillos.

## RESULTADOS

### Densidad Básica

El promedio general de la densidad básica fue  $0,47 \text{ g/cm}^3$ , con una gran variación radial, como lo expresa el rango estadístico encontrado  $R = 0,44$ , los valores menores se ubican en la sección interna (cerca de la médula) y los mayores en la parte externa (cerca de la corteza). Así mismo, existieron diferencias estadísticamente significativas entre las tres secciones (interna, media y externa) (Cuadro 2).

El análisis de varianza muestra que la ubicación del árbol, el árbol y anillo dentro del árbol influyen sobre la densidad básica (Cuadro 3).

El valor de la densidad básica de los árboles provenientes de los bordes ( $0,474 \text{ g/cm}^3$ ) es mayor al obtenido de los árboles del interior de la plantación ( $0,458 \text{ g/cm}^3$ ), la diferencia es estadísticamente significativa de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 2.** Valores generales de la densidad básica y variación radial de médula a corteza

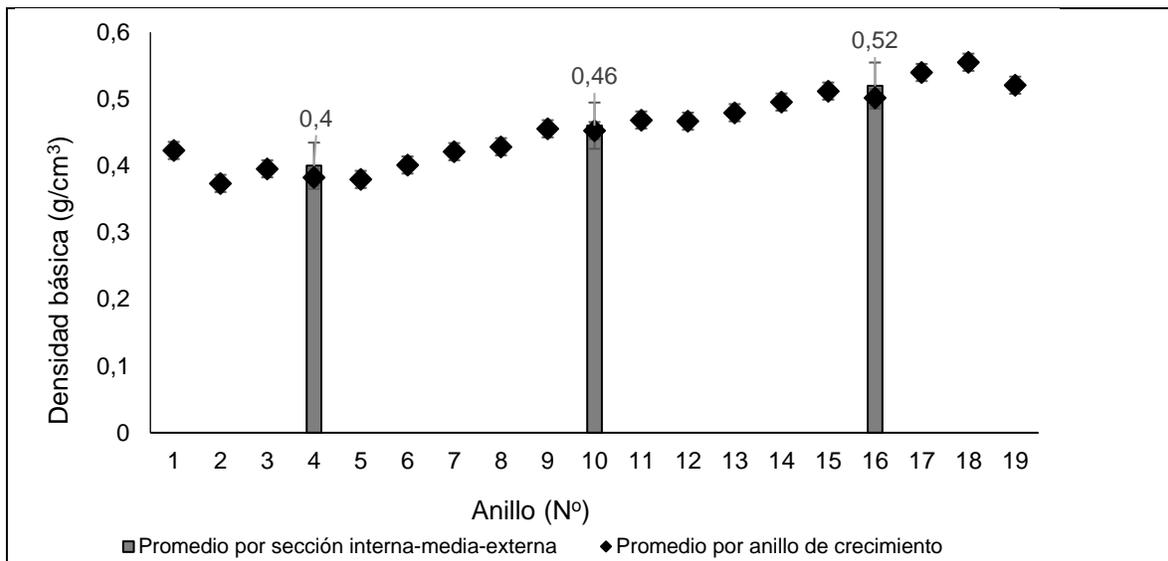
Valores		Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> )
Mínimo		0,31
Máximo		0,75
Media general (n = 260)		0,47 ± 0,005
Sección dentro del árbol	Interna (n=68)	0,40 ± 0,006 c
	Media (n=96)	0,46 ± 0,006 b
	Externa (n=96)	0,52 ± 0,008 a

± Error estándar de la media. Medias con letras distintas para una misma variable son estadísticamente diferentes, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ )

**Cuadro 3.** Prueba de F del análisis de varianza de efectos fijos para la densidad básica

Fuente de variación	Grados libertad	F calculada	Pr > F
Ubicación del árbol	1	6,89	0,0093
Árbol	15	7,16	< 0,0001
Anillo dentro del árbol	18	17,85	< 0,0001

La variación radial de la densidad básica presentó la tendencia general Tipo I (**Figura 2**), que consiste en un incremento de esta variable a partir de la médula en dirección de la corteza (Panshin & De Zeeuw, 1980).



**Figura 2.** Variación radial (médula-corteza) de la densidad básica promedio de la madera 16 árboles.

### Ancho de Anillos de Crecimiento

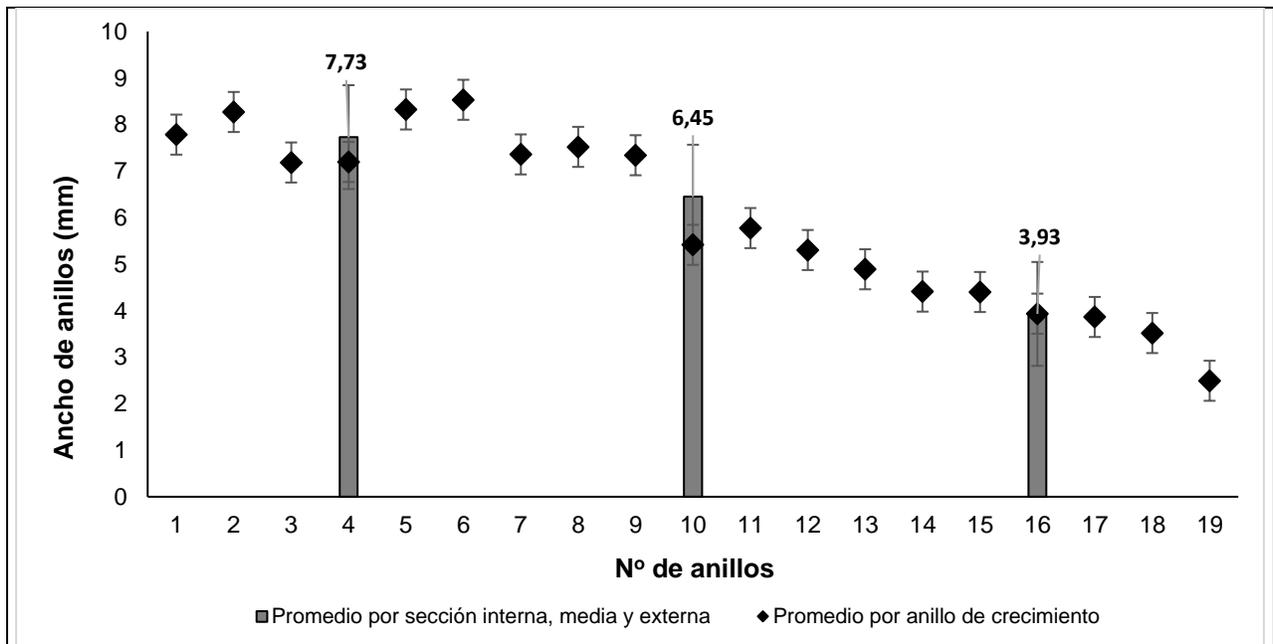
El ancho de anillos de crecimiento presentó un promedio general de 5,67 mm, con una gran variación radial, como lo expresa el rango estadístico encontrado ( $R = 12,18$ ), los valores menores se ubican en la sección externa (cerca de la corteza) y los valores mayores en la parte interna (cerca de la médula).

Así mismo, se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las tres secciones (interna, media y externa) (**Cuadro 4**), por lo tanto, la tendencia radial fue la disminución a partir de la médula y en dirección de la corteza (**Figura 3**).

**Cuadro 4.** Valores generales del ancho de anillos de crecimiento y la variación radial de médula a corteza

Valores		Ancho de anillos (mm)
Mínimo		1,08
Máximo		13,26
Media general (n = 260)		5,67 ± 0,159
Sección dentro del árbol	interna (n=68)	7,73 ± 0,309 a
	Media (n=96)	6,45 ± 0,203 b
	Externa (n=96)	3,45 ± 0,158 c

± Error estándar de la media. Medias con letras distintas para una misma variable son estadísticamente diferentes, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ )



**Figura 3.** Variación radial (médula-corteza) del ancho de anillos de crecimiento de 16 árboles

El análisis de varianza muestra que la ubicación del árbol no influye en el ancho de anillos de crecimiento, mientras que el árbol y anillo dentro del árbol si presentan una influencia en los resultados encontrados (**Cuadro 5**). El ancho de los anillos de crecimiento de los árboles del borde fue estadísticamente similar al presentado por los árboles del interior, de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ( $p < 0,05$ ); el valor promedio en árboles del borde fue de 5,736 mm, mientras que en los del interior fue de 5,598 mm.

**Cuadro 5.** Prueba de F del análisis de varianza de efectos fijos para el ancho de anillos de crecimiento

Fuente de variación	Grados libertad	F calculado	Pr > F
Ubicación del árbol	1	0,44	0,5094
Árbol	15	3,33	< 0,0001
Anillo dentro del árbol	18	18,53	< 0,0001

### Correlación de la Densidad Básica con el Ancho de Anillos de Crecimiento

La densidad básica y el ancho de anillos de crecimiento presentó una correlación significativa y negativa ( $p < 0,05$  y  $r = - 0,51$ ), lo que indica que a menor densidad básica mayor amplitud de anillos de crecimiento.

### Propiedades Mecánicas

La clasificación de las propiedades mecánicas y la densidad básica se realizó con base en las tablas presentadas por Sotomayor (2005). Los resultados de las propiedades mecánicas en su mayoría se clasifican como bajas, con excepción del Módulo de elasticidad (MOE) en flexión estática que se clasifica como media, al igual que la densidad básica (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Comparación de los resultados de la densidad básica y propiedades mecánicas de la madera de *Pinus greggi* var. *australis* con trabajos con densidad básica similar

Especie	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> )	Flexión estática (kg/cm <sup>2</sup> )			Compresión paralela (kg/cm <sup>2</sup> )			Dureza Janka (kg)	
		MOE	ELP	MOR	MOE	ELP	MOR	L	T
<i>P. greggii</i> var. <i>australis</i>	0,466	87.601 c	321 b	571 b	87.487 b	174 b	246 b	288 b	319 b
<i>P. greggii</i> Engelm. <sup>1</sup>	0,480	90.395 c	333 b	594 b	90.612 b	181 c	257 b	301 b	337 b
<i>P. maximinoi</i> <sup>2</sup>	0,497	75.183 b	NR	291 a	NR	139 b	NR	185 a	234 b
<i>P. patula</i> <sup>3</sup>	0,508	81.699 c	734 d	1.121 d	86.196 b	193 c	254 b	NR	NR
<i>Juniperuss fláccida</i> var. <i>poblana</i> <sup>4</sup>	0,505	43.377 b	448 c	839 c	62.711 b	481 e	643 e	410 c	487 c
Clasificación	c	b c	b c d	a b c d	b	b c e	b e	a b c	b c

MOE = Módulo de Elasticidad, ELP = Esfuerzo al Límite de Proporcionalidad, MOR = Módulo de Ruptura, L = Cara lateral, T = Cara transversal, NR = No Reportado. (<sup>1</sup>Torres-Ceballos, 2020; <sup>2</sup>Campos, 2015; <sup>3</sup>Yoza et al., 2015, <sup>4</sup>Borja et al., 2010); a = Muy baja, b = baja, c = media, d = alta, e) muy alta.

## DISCUSIÓN

### Densidad Básica

La densidad básica presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre árboles y en dirección radial (médula-corteza). El promedio de la densidad básica de los árboles evaluados de *Pinus greggii* var. *australis* fue 0,47 g/cm<sup>3</sup>, con una variación, de mayor a menor de la parte externa a la interna, lo anterior es atribuido a la edad de la plantación (19 años), que presenta una mayor proporción de madera juvenil (Moore & Cown, 2017) y a la disminución de ancho de anillos cercanos a la corteza (Goche-Télles et al., 2017). El promedio reportado fue similar al encontrado por López & Valencia (2001) y Torres-Ceballos (2020) en *Pinus greggii* Engelm., colectado en rodales naturales y edades superiores a 30 años; esto no coincide con lo reportado por García-Aguilar et al. (2017), quienes mencionan que existen diferencias en densidad básica cuando se obtienen muestras de diferentes condiciones de crecimiento y edad de los árboles.

La prueba de medias de Tukey ( $p < 0,05$ ) indica que existen diferencias estadísticas entre el valor de la densidad básica de los árboles provenientes de los bordes ( $0,47 \text{ g/cm}^3$ ), con el valor obtenido de los árboles del interior de la plantación ( $0,45 \text{ g/cm}^3$ ), lo que puede estar relacionado con el ancho de anillos, ya que estos fueron más angostos en los árboles del borde, lo que origina una densidad básica más alta (Goche-Télles *et al.*, 2017).

Estos resultados no coinciden con lo presentado por Nava-Cruz *et al.* (2007), quienes reportaron un crecimiento mayor en volumen y menor en peso en árboles del borde, lo que generaría una densidad básica menor, debido a que en el borde el ambiente es más cálido e iluminado y con menor competencia entre árboles (Rodríguez *et al.*, 2011).

La variación radial encontrada coincide con lo reportado en *P. oocarpa* por Gutiérrez-Vázquez & Flores-Montaño (2019) y *Pinus patula* por Goche-Télles *et al.* (2011), lo que es atribuido a la presencia de madera juvenil, a la disminución del ancho de anillos con respecto a la edad y a una mayor proporción de madera tardía en los anillos cercanos a la corteza.

Con respecto a la clasificación de la madera, se observa que fue similar (madera ligera) a *Picea glehnii* (Tanabe *et al.*, 2018), mientras que fue mayor a lo reportado para maderas provenientes de plantaciones con edades similares, siendo clasificadas como muy ligeras (Gryc *et al.*, 2011; Auty *et al.*, 2014), esto es atribuido a la especie, procedencia y a la mayor proporción de madera juvenil.

### Ancho de Anillos de Crecimiento

El ancho de anillos de crecimiento presentó un valor promedio de 5,67 mm, el cual fue inferior a *Pinus greggii* establecido en Michoacán (11,9 mm) de 10 años edad (Ramos, 2015), y a *Pinus patula* Schltld. *et Cham.* de Oaxaca (8,45 mm) de 21 años de edad (García *et al.*, 2017); la diferencia la atribuyen a la edad de la plantación y calidad de sitio, debido a que los árboles ubicados en sitios con mejor calidad muestran crecimiento más activo (Mora *et al.*, 2015).

Con respecto a la variación radial, los valores más bajos se encontraron en la parte externa (cerca de la corteza), lo que coincide con Goche-Télles *et al.* (2017), en *Pinus patula*; este comportamiento es atribuido a que los árboles presentan una etapa de rápido crecimiento inicial, que da como resultado madera de menor calidad conocida como madera juvenil, este tipo de madera presenta una mayor proporción de madera temprana, la cual va disminuyendo con la edad del arbolado (McLean, 2019); también, se atribuyen a los cambios en las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) durante el período de crecimiento (Kiaei *et al.*, 2012).

El modelo de regresión lineal es un método que por su sencillez y buenos resultados ha sido utilizado para la determinación de las propiedades mecánicas (Torres-Ceballos, 2020; Saporiti *et al.*, 2014), encontrando correlaciones significativas entre la densidad y las propiedades mecánicas de la madera (Zhu *et al.*, 2015).

La correlación entre densidad básica y ancho de anillos ( $r = -0,51$ ), representa una dependencia negativa media entre ambas variables (Hernández-Sampieri *et al.*, 1997), el valor negativo indica que a medida que la densidad básica aumenta el ancho de anillos disminuye; coincidiendo con Zeller *et al.* (2017) en *Pinus sylvestris* y superior a lo reportado por Goche-Télles *et al.* (2017) en *Pinus patula* ( $r = -0,44$ ).

En las coníferas, el incremento de la tasa de crecimiento generalmente conduce a un mayor aumento en la madera temprana generando una densidad básica baja (Zeidler y Šedivka, 2015); la madera temprana presenta traqueidas con diámetros relativamente grandes y paredes celulares delgadas (Olivar *et al.*, 2015); un aumento en el ancho del anillo conduce a una proporción menor de madera tardía, lo cual está estrechamente relacionada con la disminución de la densidad de la madera (Gryc *et al.*, 2011).

El coeficiente de determinación entre densidad básica y ancho de anillos ( $R^2 = 0,25$ ) indica que solo el 25% del ancho de anillos fue explicado por la densidad básica, siendo similar a lo reportado por Goche-Télles *et al.* (2017), por lo que lleva a considerar que otros factores como edad del cambium, tasa de

crecimiento, y presencia de madera juvenil (Auty *et al.*, 2013), así como las condiciones del medio ambiente donde se desarrollan (Hara *et al.*, 2018), pudieron interactuar con el ancho de anillos. Por otro lado, Gogoi *et al.* (2020), utilizan un modelo de regresión lineal múltiple donde la edad y ancho de anillos, muestran ser mejores predictores de la densidad de la madera.

### Propiedades Mecánicas

Los resultados de las propiedades mecánicas estimadas en *P. greggii* var. *australis*, son similares a los reportados por Torres-Ceballos (2020), en *P. greggii*, con excepción de ELP en compresión paralela, la similitud en resultados puede estar relacionado con la densidad básica, ya que esta se clasifica como media en las dos especies. Los valores bajos en resistencia y dureza, indican que la madera de esta especie obtenida en esta plantación no es apta para uso estructural, no obstante, puede emplearse como madera redonda o en escuadrías (Letourneau *et al.*, 2014), así como en elementos no estructurales como: molduras, peldaños de escaleras, mangos de herramientas de trabajo ligero (Borja *et al.*, 2010).

Los resultados en compresión paralela resultaron ser inferiores en ELP encontrado en *Pinus patula* (Yoza *et al.*, 2015); así como, a los valores de MOR y ELP de *Juniperus fláccida* var. *poblana* (Borja *et al.*, 2010), (Cuadro 3). Por otro lado, fue superior al valor de ELP reportado en *Pinus maximinoi* (Campos, 2015) y el MOE en *Juniperus fláccida* var. *poblana* (Borja *et al.*, 2010), estas diferencias pueden ser atribuidas a la edad, la especie, presencia de madera juvenil y la densidad básica, características que fueron diferentes en las especies mencionadas.

En flexión estática (**Cuadro 3**) se obtuvieron valores inferiores a lo reportado por Yoza *et al.* (2015) en *Pinus patula* en MOR y ELP, así también en MOR y ELP encontrados en *Juniperus fláccida* var. *poblana* (Borja *et al.*, 2010) lo que puede ser atribuido a que la densidad básica de ambas especies fue superior a los valores encontrados en este trabajo. Por otro lado, fueron superiores en MOE y MOR con respecto a lo presentado por Campos (2015) en *Pinus maximinoi* lo que puede atribuirse a la edad de los árboles (11 años) y a una densidad básica menor en este trabajo.

Los resultados de dureza Janka fueron superiores a lo reportado por Campos (2015) en *Pinus maximinoi*, lo que puede ser atribuido a la edad del arbolado (11 años). Por otro lado, fueron inferiores a lo reportado en *Pinus greggii* (Torres-Ceballos, 2020), y en *Juniperus fláccida* var. *poblana* (Borja *et al.*, 2010), lo que puede estar relacionado con la densidad básica de las especies, que fue mayor a la encontrada en este estudio.

Los resultados muestran una clara relación de la densidad básica de la madera con las propiedades mecánicas (Walford y Chapman, 2010; Letourneau *et al.*, 2014), como lo muestran los coeficientes de correlación ( $r = 0,73 -0,95$ ) entre la densidad básica y las propiedades mecánicas (MOR, MOE, ELP y dureza) reportados por Villarino *et al.* (2020), Missanjo y Matsumura, (2016) y Zhu *et al.* (2015), reforzando lo encontrado es este trabajo.

### CONCLUSIONES

La ubicación radial del anillo de crecimiento dentro del árbol influyó en la densidad básica y ancho de anillos de crecimiento, mientras que el efecto de borde solo influyó en la densidad básica, encontrando valores inferiores en los árboles encontrados en el centro de la plantación comparados con los presentes en el borde.

La madera de *Pinus greggii* var. *australis* evaluada se clasifica como madera ligera con relación a la densidad básica, por lo que la madera de plantaciones de esta especie con edades de 19 años no es adecuada para darle un uso estructural dados los bajos valores de resistencia y dureza encontrados, sin embargo, puede ser utilizada en usos que no requieran de mayor resistencia, como pasamanos de escaleras, madera torneada y artesanías. Los anillos de crecimiento ofrecen una perspectiva precisa y confiable al ser aplicado a estudios con diversos fines, por ejemplo, estudios dendrocronológicos.

El uso de la densidad básica como variable utilizada para estimar las propiedades mecánicas puede ser utilizado como un método no destructivo, debido a la similitud encontrada en trabajos realizados con método destructivo en especies con densidades similares.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al dueño de la plantación por la información y todas las facilidades otorgadas para la toma de datos.

## REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, MA., & Prieto-García, F. (2010).** Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlán, Hidalgo, México. *Universidad y Ciencia*, 26(2): 137-150. En: <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v26n2/v26n2a2.pdf>
- ASTM (2017).** D 2395-17. Standard Test Methods for Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Base Materials. Philadelphia. USA. 13 p. American Society for Testing and Materials.
- Auty, D., Gardiner, B.A., Achim, A., Moore, J.R. & Cameron, A.D. (2013).** Models for predicting microfibril angle variation in Scots pine. *Annals of Forest Science* 70(2): 209–218. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0248-6>
- Auty, D., Achim, A., Macdonald, E., Cameron, A.D. & Gardiner, B.A. (2014).** Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry*, 87(3): 1-10. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>
- Borja de la R., A., Machuca V.R., Fuentes, S.M., Ayerde, D.L., Fuentes L.M. & Quintero A.A. (2010).** Caracterización tecnológica de la madera de *Juniperus flaccida* var. *poblana* Martínez. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2): 261-280. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.083>
- Campos W, C.A. (2015).** Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus maximinoi* H. E. Moore; Cobán, Alta Verapaz. Tesis Lic. Universidad Rafael Landívar. San Juan Chamelco, Alta Verapaz, Guatemala. 227 p. En: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/22/Campos-Christian.pdf>
- CONAFOR (2020).** El Sector Forestal Mexicano en Cifras 2019. Comisión Nacional Forestal. Zapopán, Jalisco, México. 104 p. Comisión Nacional Forestal, México. En: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7749EI%20Sector%20Forestal%20Mexicano%20en%20Cifras%202019.pdf>
- Donahue, J.K. & López-Upton, J. (1999).** A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in México. *SIDA Contribution to Botany*, 18(4): 1083-1093. En: <https://www.jstor.org/stable/41967722>
- García Aguilar, J.A., Velazco, V.A., Rodríguez, G. & Enríquez del V., J.R. (2017).** Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schltld. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44): 132-154. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.108>
- Goche Télles, J., Rodríguez, R., Palacios, C., Prieto, J.A., Capulín, J. & Razo, R. (2017).** Relación entre densidad básica, ancho de anillos y porcentaje de madera tardía de *Pinus patula* de Hidalgo, México. In Acevedo S., O. A. Tópicos Agropecuarios. Pachuca, Hidalgo, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 83-96 p.
- Goche Télles, J., Velázquez, A., Borja de la R., A., Capulín, J. & Palacios, C. (2011).** Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* Schltld et Cham. de tres localidades en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7): 71-78. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.568>
- Gogoi, B.R., Sharma, M. & Sharma, C.L. (2020).** Radial variation of wood density in *Pinus kesiya* Royle ex Gordon. *The Indian Forester*, 146(8): 730-735. <https://doi.org/10.36808/ifi/2020/v146i8/154858>
- González, H., Maiti, R., Kumari, A. & Sarkar, N. (2016).** Variability in wood density and wood fibre characterization of woody species and their possible utility in Northeastern Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, 7(7): 1139-1150. <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.77109>

- Gryc, V., Vavrčík, H. & Horn, K. (2011).** Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. Journal of Forest Science, 57(3): 123-130. <https://doi.org/10.17221/18/2010-JFS>
- Gutiérrez Vázquez, B.N. & Flores Montaña, A. (2019).** Patrón y magnitud de la variación de la densidad de la madera en rodales semilleros de *Pinus oocarpa*. Madera y bosques, 25(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531615>
- Hara, E., Mwabumba, L. & Missanjo, E. (2018).** Within and between-tree variation in growth ring width of *Pinus oocarpa* Wood. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 13(1): 21-26. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.13.555854>
- Hernández Sampieri, R., Fernandez Collado, C. & Baptista Lucio, P. (1997).** Metodología de la investigación. McGraw-Hill, México. 497 p.
- Kiaei, M., Khademi, H., Hemmasi, A.H. & Samariha, A. (2012).** Ring width, physical and mechanical properties of Eldar Pine (Case Study on Marzanabad Site). Cellulose chemistry and technology, 46(1-2): 125-135. En: [https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2\(2012\)/p.125-135.pdf](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2(2012)/p.125-135.pdf)
- Letourneau, J., Medina, A.A., Andia, R., Andenmatten, E., De Agostini, N. & Mantilaro, N. (2014).** Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la Patagonia Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 40(2): 196-201. Disponible en <http://ria.inta.gov.ar/sites/default/files/trabajosenprensa/art.7letourneauxilo.pdf>
- López, M. & Valencia, S. (2001).** Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. Madera y Bosques, 7(1): 37-46. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711317>
- López Upton, J., Ramírez Herrera, C., Plascencia Escalante, O. & Jasso Mata, J. (2004).** Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. Agrociencia, 38(4):457-464. En: <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/338/338>
- McLean, P. (2019).** Wood properties and uses of Scots Pine in Britain. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh. Edinburgh Scotland. 36 p. En: [www.forestryresearch.gov.uk/publications](http://www.forestryresearch.gov.uk/publications)
- Missanjo, E. & Matsumura, J. (2016).** Wood density and mechanical properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. Forests, 7(7): 135. <https://doi.org/10.3390/f7070135>
- Moore, J.R. & Cown, D.J. (2017).** Corewood (juvenile wood) and Its Impact on wood utilization. Current Forestry Reports, N° 3. Pp: 107-118. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0055-2>
- Mora, F., Muñoz, R., Meza, V. & Fonseca, W. (2015).** Factores edáficos que influyeron en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte de Costa Rica. Agronomía Costarricense, 39(1): 71-89. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19547>
- Musalem Santiago, M.A. & Martínez Cantera, G. (2003).** Monografía de *Pinus greggii* Engelm. Chapingo, México. INIFAP. 230 p.
- Nava Cruz, Y., Maass, M., Briones, O. & Méndez, I. (2007).** Evaluación del efecto de borde sobre dos especies del bosque tropical caducifolio de Jalisco, México. Agrociencia, 41(1): 111-120. En: <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/522/522>
- Nowak, T., Patalas, F. & Karolak, A. (2021).** Estimating mechanical properties of wood in existing structures-selected aspects. Materials, 14(18) 1941. <https://doi.org/10.3390/ma14081941>
- Olivar, J., Rathgeber, C. & Bravo, F. (2015).** Climate change, tree-ring width and wood density of Pines in Mediterranean environments. IAWA Journal, 36(3): 257-269. <https://doi.org/10.1163/22941932-20150098>
- Panshin, A.J. & De Zeeuw, C. (1980).** Textbook of wood technology. 4a Ed. McGraw-Hill. New York, NY. USA. Pp: 249-281.
- Ramírez Herrera, C., Vargas, J. & López, J. (2005).** Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. Acta Botánica Mexicana, N° 72. Pp: 1-16. <https://doi.org/10.21829/abm72.2005.997>

- Ramos, A. (2015).** Evaluación del crecimiento en cuatro plantaciones de pino en el estado de Michoacán. Tesis Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. 127 p. En: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB\\_UMICH/204/1/FITECMA-M-2015-0618.pdf](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/204/1/FITECMA-M-2015-0618.pdf)
- Rodríguez, L., Lozada, R., Mora, A. & Lugo, L. (2011).** Efecto de borde en sistemas de enriquecimiento en fajas, Reserva Forestal Imataca, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, 1(55): 61-73. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/33488>
- Rodríguez Laguna, R., Razo, R., Valencia, S. & Meza, J. (2013).** Características dasométricas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* de nueve procedencias en Galeana, Nuevo León. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 4(18): 116-124. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i18.394>
- Saporiti, J., Louzada, L., Santos, J.A., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R. & Pereira, H. (2014).** Variation of wood density and mechanical properties of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). Materials and Design, 56: 975-980. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016>
- SAS (2002).** SAS/STAT Computer Software. User's Guide. Release 9.0. Statistical Analysis System) SAS Institute Inc. Cary, NC. USA. s/p.
- SEMARNAT (2020).** Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. Ciudad de México, México. 204 p. En: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609204&fecha=30/12/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609204&fecha=30/12/2020)
- Sotomayor, J.R. (2005).** Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera, 1(1): 3-24. En: [https://www.researchgate.net/publication/260752809\\_Caracteristicas\\_mecanicas\\_y\\_clasificacion\\_de\\_150\\_especies\\_de\\_maderas\\_Mexicanas](https://www.researchgate.net/publication/260752809_Caracteristicas_mecanicas_y_clasificacion_de_150_especies_de_maderas_Mexicanas)
- Tanabe, J., Ishiguri, F., Tamura, A., Takashima, Y., Ohshima, J., Iizuka, K. & Yokota, S. (2018).** Within-tree radial and among-family variations in wood density, microfibril angle, and mechanical properties in *Picea glehnii*. Silva Fennica, 52(2) 9914. <https://doi.org/10.14214/sf.9914>
- Torres Ceballos, D.L. (2020).** Estimación y clasificación de las propiedades mecánicas de 149 especies mexicanas de importancia industrial con métodos no destructivos. Tesis Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 93 p.
- Villarino, A.; López Rebollo, J. & Antón, N. (2020).** Analysis of mechanical behavior through digital image correlation and reliability of *Pinus halepensis* Mill. Forests, 11, 1232. <https://doi.org/10.3390/f11111232>
- Walford, G. & Chapman, J.B. (2010).** Evaluation of the strength of shaved steamed *Pinus radiata* poles. New Zealand Journal of Forestry Science, 40: 83-90. En: [https://www.researchgate.net/publication/297142054\\_Evaluation\\_of\\_the\\_strength\\_of\\_shaved\\_steamed\\_Pinus\\_radiata\\_poles](https://www.researchgate.net/publication/297142054_Evaluation_of_the_strength_of_shaved_steamed_Pinus_radiata_poles)
- Yoza, L., Baradit, E. & Acevedo, M. (2015).** Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de especies, pino (*Pinus patula*) y tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) provenientes del Perú utilizando técnicas no destructivas. Anales científicos, 76(1): 12-16. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i1.758>
- Zeidler, A. & Šedivka, P. (2015).** Influence of selected factors on wood density variability in grand fir (*Abies grandis* /Douglas/ Lindl.). Wood Research, 60(1): 33-44. En: <http://www.woodresearch.sk/wr/201501/04.pdf>
- Zeller, L.; Ammer, Ch.; Annigöfer, P.; Biber, P.; Marshall, J.; Schütze, G.; Del Río G., M. and Pretzsch (2017).** Tree ring wood density of Scots Pine and European Beech lower in mixed-species stands compared with monocultures. Forest Ecology and Management, 400: 363-374. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.018>
- Zhu, J. L.; Shi, Y.; Fang, L. Q.; Liu, X. E., and Ji, C. J. (2015).** Patterns and determinants of wood physical and mechanical properties across major tree species in China. Science China Life sciences, 58(6): 602-612. <https://doi.org/10.1007/s11427-015-4847-y>



ARTÍCULO

## **Análisis genético de un ensayo de progenies de ulmo (*Eucryphia cordifolia*) en un sitio degradado de la región de Los Ríos, Chile.**

Roberto Ipinza Carmona<sup>1</sup>; Alicia Ortega Zúñiga<sup>2</sup> & María Molina Brand<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Ingeniero Forestal, Doctor Ingeniero de Montes. Investigador del Instituto Forestal sede Valdivia, Chile. [roberto.ipinza@infor.cl](mailto:roberto.ipinza@infor.cl).

<sup>2</sup> Ingeniera Forestal, Dra. Ingeniera de Montes. Profesora de la Universidad Austral de Chile.

<sup>3</sup> Ingeniera Forestal, MSc. Investigadora Instituto Forestal sede Biobío.

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-2023.590>

Recibido: 30.06.2021; Aceptado: 07.09.2022

### **RESUMEN**

Se evalúan las mediciones anuales de altura, hasta los 47 meses de edad, de plantas de 9 progenies de ulmo (*Eucryphia cordifolia*) incluidas en un ensayo de métodos de plantación establecido en tres quilantales del predio Pumillahue en la comuna de Mariquina en la región de los Ríos. Se calculan los valores medios de altura a cada edad y se determinan valores de heredabilidad y correlaciones fenotípicas y genéticas entre las alturas medidas a diferentes edades. Se identifican familias de crecimiento sobresaliente, especulándose respecto a su eventual propagación clonal y recomendando continuar el estudio hacia edades más avanzadas.

**Palabras clave:** *Eucryphia cordifolia*, altura, parámetros genéticos.

### **SUMMARY**

Annual height measurements up to 47 months old, of plants of nine ulmo progenies (*Eucryphia cordifolia*) included in a trial of planting methods are evaluated. The trial is established in three "quilantales" (native bamboo invaded areas) of the Pumillahue farm in the Mariquina commune, in the Los Rios region. Mean height values are calculated at each age; heritability values and phenotypic and genetic correlations are determined between the heights measured at different ages. Families with outstanding growth are identified, speculating about their eventual clonal spread and recommending continuing the study at older ages.

**Keywords:** *Eucryphia cordifolia*, height, genetic parameters

## **INTRODUCCIÓN**

El ulmo (*Eucryphia cordifolia* Cav.) es un árbol siempreverde corpulento de copa redondeada y tronco recto, alcanza una altura de hasta 40 m y un diámetro de hasta 2 m (Morales, 2013); es una especie multipropósito, melífera-maderera, e ideal para restaurar bosques degradados mediante plantaciones suplementarias mixtas (Donoso & Soto, 2010).

En el predio Pumillahue (comuna de San José de la Mariquina, Región de los Ríos), el ulmo forma parte de una unidad vegetacional de amplia extensión, dominada por roble, *Nothofagus obliqua* y con un variado elenco florístico en el que se destaca la presencia de elementos laurifolios (Urrutia & Fuentes, 2021). Usando el concepto de estación forestal, definido por Gajardo *et al.* (2005), las zonas con ulmo de Pumillahue corresponderían a la Estación Forestal N° 11 de la clasificación de Navarro *et al.* (2014) denominada Siempreverde de olivillo (*Aextoxicon punctatum*), ulmo, lingue (*Persea lingue*) y mañío (*Podocarpus saligna*) (Cabello *et al.*, 2021).

En relación a las plantaciones existen interesantes experiencias con especies de tolerancia intermedia como la tepa (*Laureliopsis philippiana*) y el ulmo. El crecimiento de las plantaciones jóvenes de estas especies responde al índice de competencia de traslape de copas, sugiriendo que la competencia ocurre principalmente por la luz (Uteau & Donoso, 2009).

En la zona centro-sur de Chile el fenómeno de floración de *Chusquea quila* abarca extensas superficies y es una oportunidad única de que estos sitios forestales desaprovechados puedan reconvertirse en bosques productivos a través de plantaciones forestales (Gonzalez *et al.*, 1997).

El objetivo de este artículo es determinar los parámetros genéticos de las progenies de nueve madres de ulmo seleccionadas en el predio Pumillahue, en la Región de los Ríos. Tales progenies fueron incluidas en un ensayo de establecimiento de una plantación mixta de cinco especies nativas en quilantales habilitados para plantación en el predio Pumillahue. En el caso de ulmo, la semilla colectada desde cada madre fue viverizada y plantada manteniendo la identificación del árbol madre original. Consecuentemente, en lo que concierne a la especie ulmo, es un ensayo de progenie con estructura familiar conocida (progenies de medios hermanos), y por esta razón se puede determinar los parámetros genéticos que permiten en el corto, mediano y largo plazo orientar el mejoramiento genético de esta especie.



(Fotografía: R. Ipinza)

Figura 1. Flor y fruto de ulmo

## MATERIAL Y MÉTODO

### Selección de Árboles

Las áreas seleccionadas del predio Pumillahue para la colecta de semillas exhiben una intervención antrópica relativamente baja, por lo menos en los últimos 50 años, ya que antes hay evidencia de floreo y corta de áreas a tala rasa de los árboles de mayor valor económico. Las áreas en que se establecieron las plantas dentro del predio corresponden a un bosque degradado nivel 3, según la clasificación de Muñoz *et al.* (2018), que se caracterizan por estar muy alteradas, producto de talas en que se observan tocones o raíces expuestas, con escasos individuos adultos o bien áreas con una fuerte intervención agropecuaria, donde se observa poca o nula regeneración de individuos jóvenes producto del ramoneo por animales y con abundante presencia de *Chusquea quila*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> De acuerdo al Dr. Víctor Sandoval (QEPD) existen aproximadamente 500.000 hectárea de superficie invadidas por quilantales en áreas de bosque nativo (Comunicación Personal, 2017).

Se seleccionó cinco especies claves del bosque siempreverde (ulmo, roble, tepa, olivillo y lingue) en tres sitios del predio. Se trató de árboles adultos, en producción de semilla, y distanciados de otros ejemplares seleccionados por al menos 30 a 40 metros. Bajo la copa de cada árbol seleccionado se extendió una malla, para coleccionar sus semillas; en el caso de ulmo la semilla se colectó mediante escalamiento de cada uno de los nueve individuos seleccionados, esto para asegurar la trazabilidad desde la madre que produce la semilla hasta su plantación. En la **Figura 2** se muestra a un escalador cosechando frutos de ulmo.



(Fotografía: R. Ipinza)

**Figura 2.** Escalador subiendo un ulmo adulto para cosechar frutos

La semilla se colectó en bolsas de papel, se deshumidificó, se limpió y pesó, luego se secó y almacenó a una temperatura de 4°C, rotulando la especie, la cantidad, fecha de colecta y las variables de laboratorio (Ipinza & Hasbún, 2021). Para el caso específico del ulmo, las capsulas se colectaron por árbol y se colocaron en bolsas rotuladas para ser transportadas al laboratorio. Las capsulas fueron secadas a 25 grados, luego dejadas en disco de Petri para ser contadas. En algunas ocasiones las semillas fueron separadas manualmente de la capsula y luego almacenadas para su posterior viverización. El proceso de viverización se llevó a cabo siguiendo los procedimientos indicados por Gutiérrez (2021), no obstante, las especies lingue, olivillo y tepa se sembraron en junio de 2016, mientras que, roble, ulmo y una nueva partida de tepa fueron sembradas en septiembre de 2016, en el Centro Tecnológico de la Planta del Instituto Forestal, sede Biobío.

### Ensayos de Campo

Las progenies de ulmo evaluadas corresponden a las plantas obtenidas a partir de las semillas colectadas individualmente desde 9 árboles madres (**Cuadro 1**).

Las plantas evaluadas estaban incluidas en un ensayo de métodos de plantación, establecido en junio de 2017, en fajas habilitadas en tres quilantales del predio Pumillahue. En él se consideran cinco especies y seis tratamientos consistentes en combinaciones de densidad de plantación y proporción entre especies pioneras y tolerantes, en un diseño de bloques al azar, donde cada bloque corresponde a un quilantal (Ipinza, 2021). Para efectos de este análisis solo se consideran las plantas de ulmo existentes en el ensayo, ellas se representan en seis parcelas dentro de cada uno de los tres quilantales, con un número aproximado de una planta de ulmo de cada progenie por parcela, y entre 5 y 8 plantas de cada progenie por quilantal (**Cuadro 2**).

**Cuadro 1.** Códigos de progenies y de árboles madres de ulmo representados en el ensayo evaluado

Código de árbol madre en terreno	Código de identificación de progenie en el análisis
U1	101
U2	102
U3	103
U4	104
U5	105
Ux	106
U101	107
2U1	108
2U2	109

**Cuadro 2.** Número de plantas de ulmo por progenie y quilantal

Código de árbol madre en terreno	Código de identificación de progenie en el análisis	Quilantal 1	Quilantal 2	Quilantal 3	Total
U1	101	8	7	8	23
U2	102	7	7	8	22
U3	103	7	8	8	23
U4	104	7	8	7	22
U5	105	6	8	7	21
Ux	106	7	8	7	22
U101	107	7	8	7	22
2U1	108	5	8	7	20
2U2	109	7	8	7	22
Total Plantas		61	70	66	197
Parcelas/quilantal		6	6	6	18
Plantas/parcela/quilantal		10,2	11,6	11,0	10,9
Plantas/progenie/parcela/quilantal		1,1	1,3	1,2	1,2

### Evaluación y Análisis

Desde su instalación en el año 2017, al ensayo se le ha medido anualmente la altura total de sus plantas (**Cuadro 3**). En cada ocasión los árboles muertos fueron considerados datos perdidos o “missing”, en la base de datos.

**Cuadro 3.** Fechas de medición (edad) del rasgo altura (cm).

Fecha de Medición	Edad (meses)	Rasgos
Junio 2017	t <sub>0</sub>	Altura (cm) y sanidad
Mayo 2018	t <sub>11</sub>	Altura (cm) y sanidad
Febrero 2019	t <sub>20</sub>	Altura (cm) y sanidad
Junio 2020	t <sub>36</sub>	Altura (cm) y sanidad
Mayo 2021	t <sub>47</sub>	Altura (cm) y sanidad

En primer lugar se realizó un análisis gráfico descriptivo de la variable altura (cm), en función de la edad (meses), familias y de los quilantales o bloques.

Luego se procedió a un análisis estadístico de las alturas de ulmo, siguiendo el modelo lineal de la **Expresión (1)**, sugerido por Borralho (1995).

$$Y = \mu + Xb + Zu + e \quad (1)$$

Donde:

Y = Vector de fenotipos  
 $\mu$  = Promedio  
X y Z = Matrices de incidencia de efectos genéticos aleatorios  
b = Vector de coeficientes de regresión  
u = Vector que contiene los efectos genéticos aditivos ( $\sim N(0, \sigma^2_u)$ )  
e = Vector que contiene los valores residuales ( $\sim N(0, \sigma^2_e)$ )

El análisis estadístico se desarrolló en dos etapas. Primero, un análisis univariado por edad (fecha de medición) para la respectiva altura; este incluye el efecto bloque y el efecto familia para obtener los valores de mejora y los componentes de varianza por edad (fecha de medición) de la altura. La segunda etapa corresponde a un análisis multivariado (modelo completo) para los componentes de varianza, y el mejor estimador lineal insesgado (BLUP) de los valores genéticos, usando un modelo de ecuaciones lineales mixtas, tal como lo describe Henderson (1984). Los componentes de varianza fueron estimados usando la máxima verosimilitud restringida (REML) (Patterson & Thompson, 1971). Todos los análisis se llevaron a cabo mediante el programa ASREML (Gilmour *et al.*, 1995; 1997).

A partir de los componentes de varianza para cada edad o fecha de medición en forma separada, se estimó la heredabilidad individual en sentido restringido ( $h^2$ ) de la altura (cm), para cada edad (**Expresión 2**)

$$h^2 = \sigma^2_a / (\sigma^2_a + \sigma^2_e) \quad (2)$$

Donde:

$\sigma^2_a$  = Varianza genética aditiva  
 $\sigma^2_e$  = Varianza residual

Las correlaciones genéticas, fenotípicas y residual entre las distintas edades (fechas de medición),  $r(x,y)$  para el rasgo altura (cm), fluctúan entre -1 a +1 y se calcularon como se indica en la **Expresión (3)**.

$$r(x,y) = \text{COV}_{(x,y)} / \text{SQRT}(\sigma^2(x) + \sigma^2(y)) \quad (3)$$

Donde:

$\sigma^2(x) + \sigma^2(y)$  = Estimaciones del componente de varianza genético aditivo o fenotipo o residual para los rasgos x e y (alturas a distintas edades)  
 $\text{COV}_{(x,y)}$  = Covarianza entre esos dos rasgos (altura en dos edades).

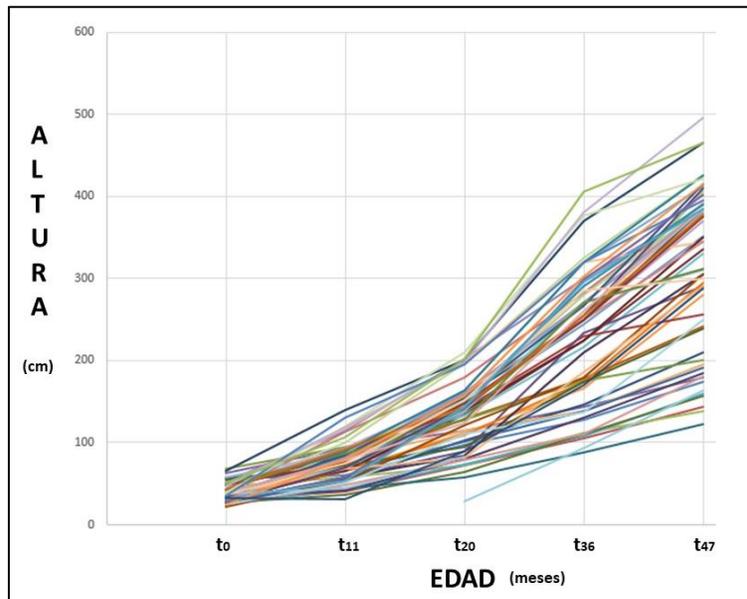
El coeficiente de parentesco usado para estimar las heredabilidades para las familias de polinización abierta en el ensayo fue de 0,25. El error estándar de los parámetros genéticos fue obtenido directamente de ASREML (Gilmour *et al.*, 1997). El ASREML también permite estimar el valor de mejora para cada árbol de ulmo, a cada edad para el rasgo altura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

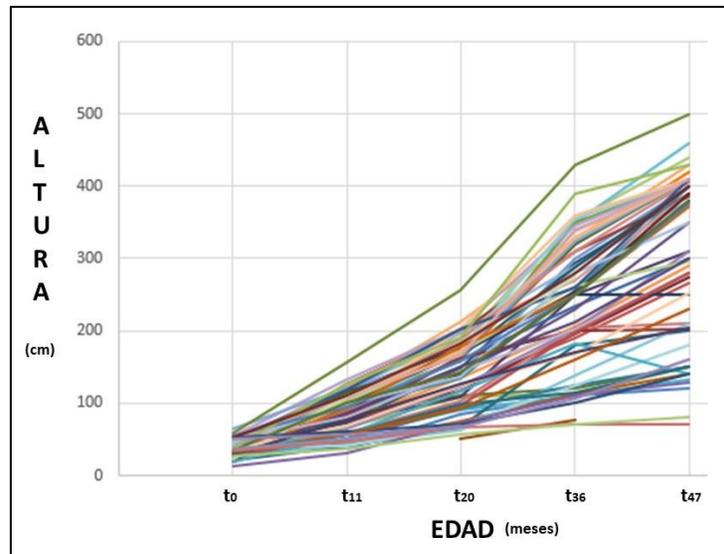
### Tendencias de Crecimiento por Quilantal

A continuación, se muestra la tendencia de crecimiento en la altura de todas las plantas de ulmo presentes en los Quilantales 1, 2 y 3 (**Figuras 3, 4 y 5**, respectivamente). Algunas líneas cortadas representan valores perdidos y luego plantas reemplazadas de la misma familia; las disminuciones de

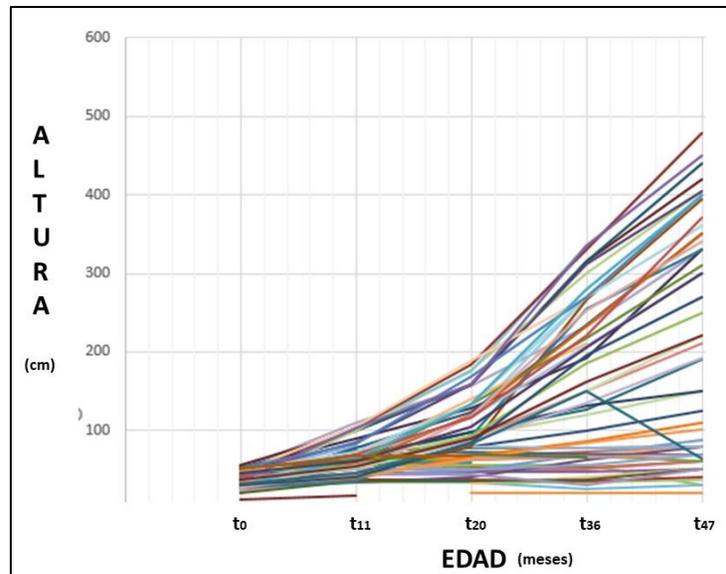
crecimiento representan plantas dañadas por animales e insectos nativos. Las plantas con esas características fueron declaradas como valores "missing" para el análisis estadístico.



**Figura 3.** Tendencia de crecimiento en altura (cm) de todas las plantas de ulmo a lo largo de sus 47 meses de vida en el Quilantal 1.



**Figura 4.** Tendencia de crecimiento en altura (cm) de todas las plantas de ulmo a lo largo de sus 47 meses de vida en el Quilantal 2.



**Figura 5.** Tendencia de crecimiento en altura (cm) de todas las plantas de ulmo a lo largo de sus 47 meses de vida en el Quilantal 3.

El Quilantal 1 (**Figura 3**) tiene una tendencia superior en la altura, que va desde 1 a 5 metros en el mes 47 (t47). El Quilantal 2 (**Figura 4**) mantiene la tendencia, aunque es más amplia en el mes 47 (t47), donde es posible encontrar plantas de ulmo menores a un metro de altura. En cambio, la variación en el Quilantal 3 (**Figura 5**) es aún mayor, pero no alcanzan los niveles de altura máxima encontrados en t47 en los Quilantales 2 y 3.

### Tendencias de Crecimiento por Familia y Quilantal

Los valores medios de altura, y sus respectivas desviaciones estándar (d.e.), para cada una de las familias de ulmo en cada quilantal, se presentan en las **Figuras 6-8**. Estas figuras evidencian que las mayores diferencias de altura se observan en las dos últimas mediciones (t36 y t47), tanto en sus valores promedios como las desviaciones estándar. El Quilantal 3 presenta los menores valores en estos dos estadísticos, en tanto los Quilantales 1 y 2 presentan cierta similitud, aunque la expresión familiar no es consistente. Un elemento que llama la atención es la familia 107 con el mayor valor promedio y la menor desviación estándar en el Quilantal 1.

En los quilantales 1 y 2 hay cierta consistencia entre los valores promedios y sus desviaciones estándar, lo que podría indicar que hay un desempeño "normal", quizás respondiendo a diferencias ambientales. Por su parte, el Quilantal 3 presenta una alta desviación estándar respecto a sus valores promedios, de hecho, su desempeño es bajo y con mucha variabilidad. La familia 101, exhibe el mejor desempeño promedio en el Quilantal 2 y 3.

Finalmente, se observa que las desviaciones estándar de las dos últimas mediciones en el mes 36 y 47 (t36 y t47) tienden a acercarse, incluso en algunos casos desciende, aunque sus promedios manifiestan un crecimiento ascendente. En este caso, nuevamente destaca el Quilantal 3 donde no se observa esta relación. Es probable que este bloque (Quilantal 3) en el corto plazo tenga que subdividirse ya que exhibe cierto grado de heterogeneidad espacial en su suelo.

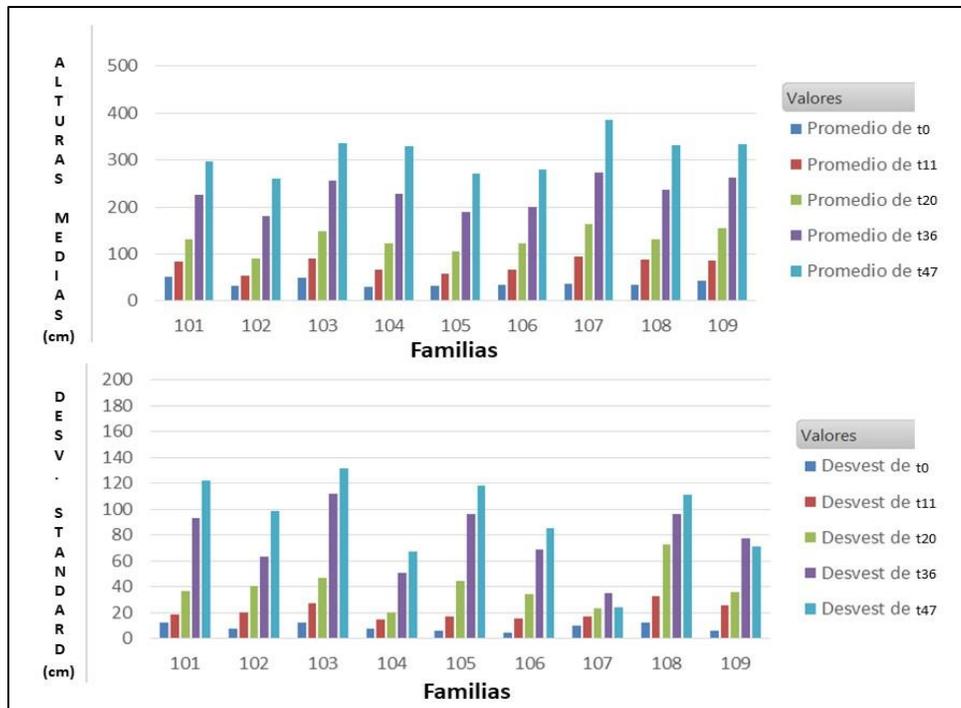


Figura 6. Alturas medias (arriba) y desviaciones estándar (abajo) en cm, por edad y familia, en el Quilantal 1.

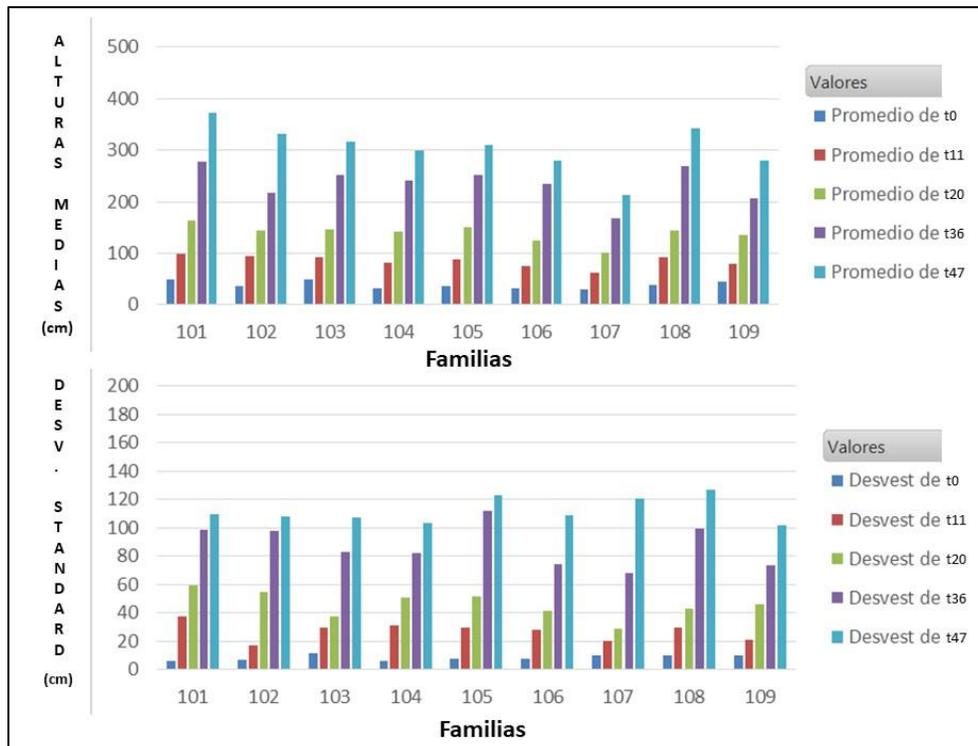
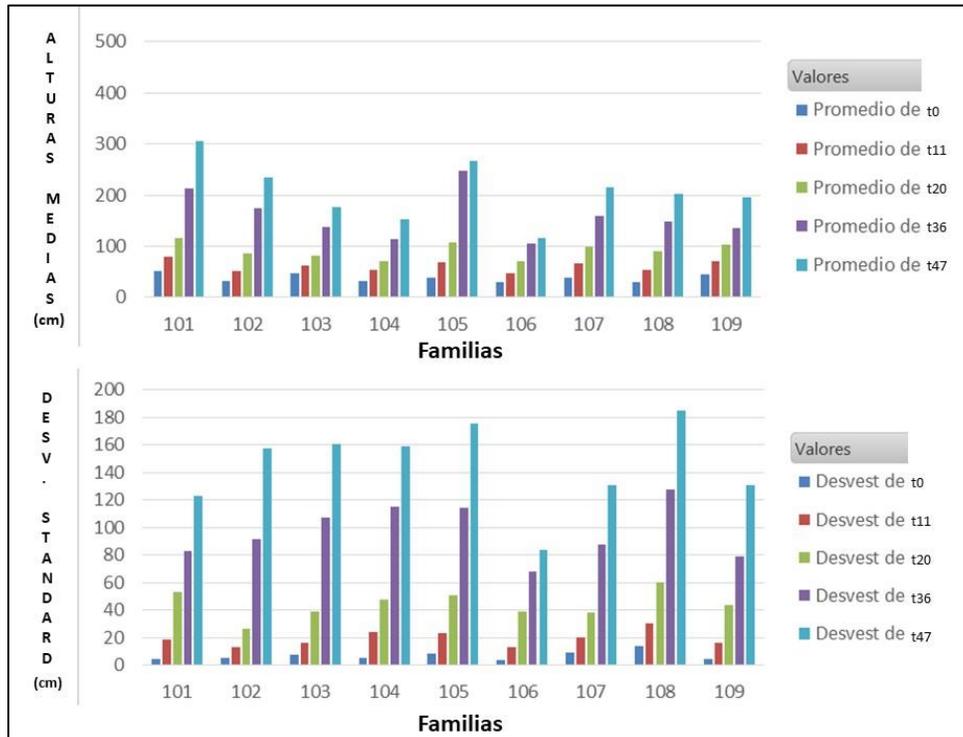


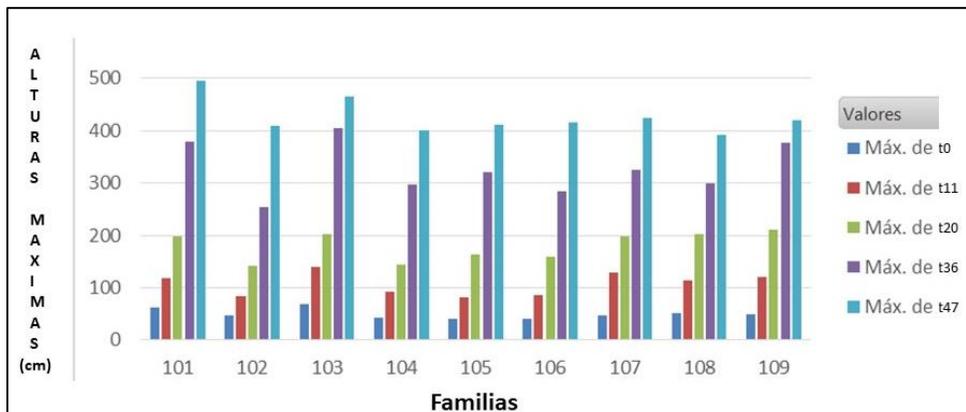
Figura 7. Alturas medias (arriba) y desviaciones estándar (abajo) en cm, por edad y familia, en el Quilantal 2.



**Figura 8.** Alturas medias (arriba) y desviaciones estándar (abajo) en cm, por edad y familia, en el Quilantal 3.

### Valores Individuales Máximos de Altura por Familia y por Quilantal

Los valores individuales máximos en altura, alcanzados a cada edad (t0 a t47) por cada una de las familias de ulmo, se presentan en las **Figuras 9-11**, separados por quilantal.



**Figura 9.** Alturas máximas en cm, por edad y familia, en el Quilantal 1

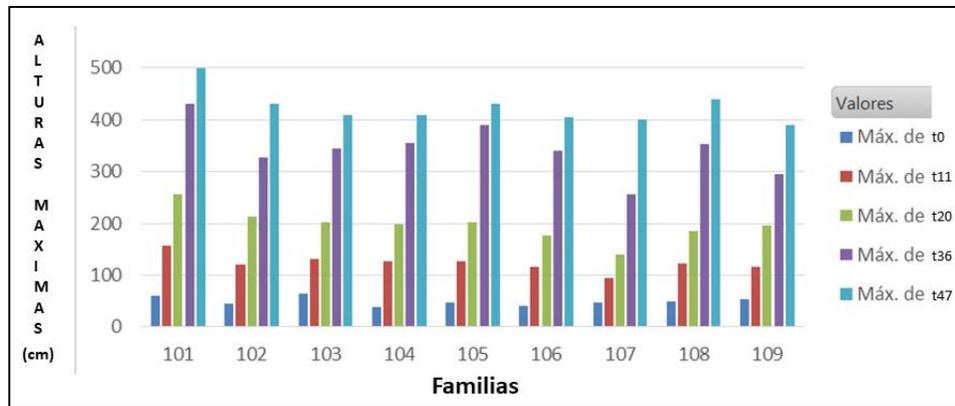


Figura 10. Alturas máximas en cm, por edad y familia, en el Quilantal 2

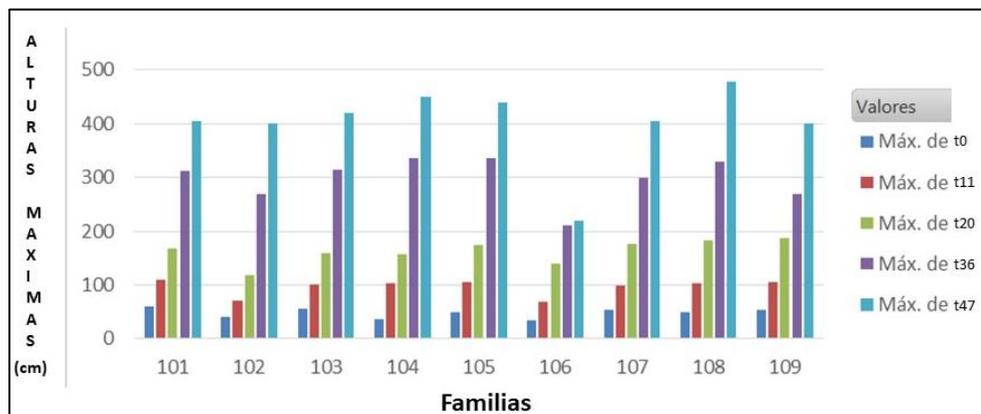


Figura 11. Alturas máximas en cm, por edad y familia, en el Quilantal 3.

En los quilantales 1 y 2 (Figuras 9 y 10, respectivamente) la máxima altura de la medición del mes 47 (t47) la alcanza la familia 101. En el Quilantal 3 (Figura 11), la máxima altura es alcanzada por la familia 108. Estos resultados pueden orientar el uso clonal para la propagación de este material.

### Parámetros Genéticos

- Heredabilidad

Las heredabilidades en sentido estricto, con sus respectivos errores estándar, para la variable altura en cada una de las edades evaluadas (t0, t11, t20, t36 y t47) con el modelo familiar utilizado, se entregan en el Cuadro 4.

La heredabilidad es un cociente entre la variación debida a la acción genética en relación a la variación total. El cuadro 4 muestra que las heredabilidades de las alturas desde t0 a t20, son bajas y solo comienza a subir a partir del mes 36 (t36), alcanzando un valor moderado en el mes 47 (t47). Esto indica que hasta el mes 20 la variabilidad genética no se expresa mayormente, de modo que la variabilidad ambiental resulta proporcionalmente mucho mayor que la genética; posteriormente, a partir del mes 36 comienza a expresarse los genes responsables de la altura. Heredabilidades similares a  $t47 = 0,15$ , se han obtenido para la altura en los ensayos de progenie y procedencia de *Eucalyptus nitens* a los cinco años (Ipinza *et al.* 1997), en el predio San Lorenzo (Región del Biobío), Vista Alegre (Región de los Ríos) y el Bajo (Región de Aysén).

**Cuadro 4.** Heredabilidad ( $h^2$ ) y error estándar (e.e) de la altura de los ulmos en cada edad de medición (meses)

Altura/edad	$h^2 \pm e.e$
t0	0,06 $\pm$ 0,030
t11	0,08 $\pm$ 0,008
t20	0,04 $\pm$ 0,004
t36	0,10 $\pm$ 0,009
t47	0,15 $\pm$ 0,013

- Correlaciones

En el **Cuadro 5** se presenta la correlación genética aditiva entre las alturas a distintas edades, con su correspondiente error estándar. En él se observa que la correlación aditiva entre la altura en t0 y la altura en t47 alcanza su máximo valor ( $r_a = 0,7162$ ), ello implica que no se pueden hacer selecciones antes de los 47 meses (t47).

**Cuadro 5.** Correlación genética aditiva y error estándar (e.e.) entre pares de alturas a distintas edades de medición en meses.

Altura/edad	t0 $\pm$ e.e	t11 $\pm$ e.e	t20 $\pm$ e.e	t36 $\pm$ e.e	t47 $\pm$ e.e
t0 $\pm$ e.e	1				
t11 $\pm$ e.e	0,1538 $\pm$ 0,3219	1			
t20 $\pm$ e.e	0,1536 $\pm$ 0,0365	0,3333 $\pm$ 0,0000	1		
t36 $\pm$ e.e	0,3549 $\pm$ 0,0843	0,2521 $\pm$ 0,0000	0,0134 $\pm$ 0,0000	1	
t47 $\pm$ e.e	0,7162 $\pm$ 0,1701	0,5800 $\pm$ 0,0000	0,0074 $\pm$ 0,0000	0,0017 $\pm$ 0,0000	1

En el **Cuadro 6** se presenta la correlación fenotípica entre pares de alturas a distintas edades, con su correspondiente error estándar. Se observa que las correlaciones fenotípicas desde t0 a t47 experimentan una disminución, en cambio la tendencia de la correlación genética es inversa, es decir aumenta la correlación edad – edad a medida que progresa esta última.

**Cuadro 6.** Correlación fenotípica y error estándar (e.e) entre pares de alturas a distintas edades de medición en meses.

Altura/edad	t0 $\pm$ e.e	t11 $\pm$ e.e	t20 $\pm$ e.e	t36 $\pm$ e.e	t47 $\pm$ e.e
t0 $\pm$ e.e	1				
t11 $\pm$ e.e	0,897 $\pm$ 0,0581	1			
t20 $\pm$ e.e	0,299 $\pm$ 0,0628	0,7895 $\pm$ 0,0251	1		
t36 $\pm$ e.e	0,1732 $\pm$ 0,0653	0,5617 $\pm$ 0,0448	0,8321 $\pm$ 0,0187	1	
t47 $\pm$ e.e	0,1678 $\pm$ 0,0640	0,5088 $\pm$ 0,0481	0,7591 $\pm$ 0,0254	0,8498 $\pm$ 0,0138	1

En el **Cuadro 7** se presenta la correlación residual entre pares de alturas a distintas edades, con su correspondiente error estándar. En él se observa que la correlación residual edad – edad tiende a disminuir hacia los 47 meses, ello implica que el efecto de la variación ambiental tiende a disminuir.

**Cuadro 7.** Correlación residual y error estándar (e.e) entre pares de alturas a distintas edades de medición en meses.

Altura/edad	t0±e.e	t11±e.e	t20±e.e	t36±e.e	t47±e.e
t0±e.e	1				
t11±e.e	0,5168±0,0535	1			
t20±e.e	0,3080±0,0659	0,8200±0,0248	1		
t36±e.e	0,1578±0,0711	0,5919±0,0479	0,8898±0,0160	1	
t47±e.e	0,1078±0,0722	0,5032±0,0547	0,8383±0,0228	0,9663±0,0051	1

## CONCLUSIONES

Las plantas de ulmo del Quilantal 1 exhiben el mejor desempeño en crecimiento en altura, les siguen las del Quilantal 2 y luego las del Quilantal 3, ello implica que considerar el efecto bloque (Quilantal) ha sido adecuado, aunque será necesario reordenar el Quilantal 3.

La familia 101 muestra también el mejor desempeño fenotípico en altura en el Quilantal 2 y 3. La familia 107 en el Quilantal 1 tiene el mejor desempeño medio superior, lo que es muy interesante, con el objeto de la propagación vía sexual, ya que además exhibe una baja desviación estándar.

Progenies de la familia 101, alcanza la máxima altura a los 47 meses de edad en el Quilantal 1 y 2. En el Quilantal 3 la máxima altura a los 47 meses es alcanzada por progenie de la familia 108, lo cual la hace apropiada para la propagación vía clonal.

La heredabilidad individual en sentido estricto muestra valores iniciales bajos, pero a partir del mes 36 y 47 esta comienza a subir, es decir los genes responsables de la altura comienzan a ser transmitidos de madres a la progenie. Esto es indicativo que se deben continuar con nuevas mediciones anuales para verificar estas tendencias.

La correlación genética edad – edad entre las alturas se incrementa a mayor edad y la correlación fenotípica y residual disminuyen.

Hasta este momento (mes 47), este estudio debe ser considerado como una prueba de concepto por lo tanto es de carácter exploratorio y orientativo.

El ensayo debería continuar midiéndose anualmente, por lo menos hasta los próximos 5 años.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos el apoyo prestado por la Corporación Nacional Forestal de la Región de los Ríos, por su permanente preocupación y consideración, en especial al Sr. Neftalí Soto y Luis Riquelme. También agradecemos al FIBN por el financiamiento de este estudio.

## REFERENCIAS

- Borralho, N. (1995).** The impact of individual tree mixed model methods (BLUP) in tree breeding strategies. En: Potts, B., Borralho, N., Reid, J., Cromer, R., Tibbits, W. & Raymond, C. (Eds). *Eucalyptus Plantation: Improving Fibre Yield and Quality*. Proc. CRC-IUFRO. Conf., Hobart, 19-24 Feb. CRC for Temperate Hardwood Forestry, Hobart (Australia). Pp: 141-145.
- Cabello, J., Navarro, C. & Ipinza, R. (2021).** Definición del ecosistema de referencia en el tipo forestal siempreverde, una aplicación metodológica en la región de los Ríos. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. (Eds). *Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados* (capítulo 6). Instituto Forestal. (En edición).

- Donoso, P. & Soto, D. (2010).** Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Revista Bosque Nativo* 47:10-17.
- Gajardo, R., Luebert, F. & Estay, M. (2005).** Ensayo de una tipología de estaciones forestales en el Parque Nacional Tolhuaca, Chile. *Nota Técnica. Bosque*, 26(2): 47-56. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000200007>
- Gilmour, A.R., Thompson, R. & Cullis, BR. (1995).** Average information REML, an efficient algorithm for variance parameter estimation in linear mixed models. *Biometrics*, N° 51. Pp: 1440-1450. <https://doi.org/10.2307/2533274>
- Gilmour, A.R., Thompson, R., Cullis, BR. & Welham, SJ. (1997).** ASREML user's manual. July 24, 1997. 100 p.
- Gutiérrez, B. (2021).** Consideraciones genéticas para la obtención de semillas y viverización de plantas para restauración. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. Asenjo (Eds). *Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados (capítulo 9)*. Instituto Forestal. (En edición).
- Gonzalez, M., Donoso, C. & Fraver, S. (1997).** Respuesta inicial de *Eucryphia cordifolia* Cav., *Laurelia sempervirens* R. et P. Tul. y *Aextoxicon punctatum* R. et P. en plantaciones mixtas en sectores recientemente florecidos con *Chusquea quila* Kunth en el centro-sur de Chile. *Bosque*, 18(1): 53-59. <https://doi.org/10.4206/bosque.1997.v18n1-07>
- Henderson, C.R. (1984).** Applications of linear models in animal breeding. University of Guelph Press, Guelph.
- Ipinza, R., Gutiérrez, B. & Molina, M. (1997).** Análisis genético univariado de siete ensayos de progenie y procedencia de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, en Chile. *Potencial Genético y Silvícola*. En: IUFRO Conference Modelling Growth of Fast Grown Tree Species. 3-5 September 1997. Valdivia - Chile.
- Ipinza, R. (2021).** Establecimiento de plantaciones nativas de alta biodiversidad. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. (Eds). *Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados (capítulo 10)*. Instituto Forestal. (En edición).
- Ipinza, R. & Hasbún, R. (2021).** Ruta semillera: una alternativa ante la emergencia. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. (Eds). *Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados (capítulo 8)*. Instituto Forestal. (En edición).
- Morales, J. (2013).** Información tecnológica de productos forestales no madereros del bosque nativo en Chile. *Antecedentes Silvícolas y Tecnológicos. Eucryphia cordifolia* (Ulmo). *Productos Forestales no madereros del Bosque Nativo*. INFOR. 27 p.
- Muñoz, F., Hasbún, R. & Alarcón, D. (2018).** Informe final proyecto CONAF FIBN 009/2016 "Criterios técnicos para caracterizar bosques nativos degradados del tipo forestal Siempreverde y guías de restauración usando bosques de referencia". Universidad de Concepción. Fondo de Investigación del Bosque Nativo. 101 p.
- Navarro, C., Hauenstein, E., Pinares, J., Esse, C. & Cabello, J. (2014).** Catálogo de Estaciones Forestales del bosque nativo de la Región de La Araucanía. - Proyecto INNOVA CORFO 11BPC-10164(11-13): Implementación de una Metodología de Tipificación de Bosque Nativo para la aplicación de la Ley 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. Corporación Nacional Forestal, Universidad Católica de Temuco. 231 p.
- Patterson, H.D. & Thompson, R. (1971).** Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. *Biometrika*, N° 58. Pp: 545-554. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.545>
- Urrutia, J. & Fuentes, A. (2021).** Métodos fitoecológicos aplicados a la caracterización actual de dos ecosistemas degradados. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. (Eds). *Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados (capítulo 5)*. Instituto Forestal. (En edición).
- Uteau, D. & Donoso, P. (2009).** Early individual growth of *Eucryphia cordifolia* and *Laurelia sempervirens* planted under different competition conditions in southcentral Chile. *Cien. Inv. Agr.* 36(1):85-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202009000100008>





ARTÍCULO

## Crecimiento y supervivencia de cinco especies nativas en un ensayo de plantación con consideraciones genéticas, en bosque siempreverde estructuralmente alterado.

Braulio Gutiérrez Caro<sup>1\*</sup> & Roberto Ipinza Carmona<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Forestal, Sede Biobío. [braulio.gutierrez@infor.cl](mailto:braulio.gutierrez@infor.cl)

<sup>2</sup> Instituto Forestal, Sede Los Ríos.

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.591>

Recibido: 15.06.2023; Aceptado: 25.07.2023

### RESUMEN

Se analizó una medición de altura y supervivencia, al tercer año de crecimiento en terreno, de un ensayo de plantación de cinco especies nativas: ulmo (*Eucryphia cordifolia*) y lingue (*Persea lingue*) a nivel de progenies, y tepa (*Laureliopsis philippiana*), roble (*Nothofagus obliqua*) y olivillo (*Aextoxicon punctatum*) como grupos diversos representativos del bosque local. Todas ellas plantadas en fajas habilitadas en quilantales de un bosque siempreverde severamente degradado en la provincia de Valdivia, Chile. Con los datos de la medición se efectuó el análisis descriptivo del ensayo y una evaluación estadística usando análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple (Tuckey), para evaluar el efecto de la densidad de plantación y de la proporción de especies intolerantes/tolerantes sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas, para un nivel de significancia de 0,05%. Se concluye que el ensayo presenta en general una alta supervivencia (86,4%). Las plantas se encuentran creciendo activamente, observándose mayor altura en las intolerantes o pioneras que en las tolerantes. No se observó efecto de los tratamientos sobre la supervivencia ( $p\text{-value} > 0,05$ ), pero se detectan diferencias significativas de altura particularmente para roble y olivillo. En general los tratamientos con mayor proporción de especies pioneras intolerantes, mostraron significativamente más crecimiento que aquellos en que estaban en igual proporción ( $p\text{-value} = 0,0003$ ). En cualquier caso, las evaluaciones son tempranas por lo que es necesario conservar y hacer labores de mantención del ensayo para continuar con evaluaciones en estados de desarrollo más avanzados.

**Palabras clave:** bosque siempreverde, plantación en fajas, quilantales, restauración.

### SUMMARY

We analyzed a height and survival measurement, at the third year of growth in the field, of a planting trial of five native species: ulmo (*Eucryphia cordifolia*) and lingue (*Persea lingue*) at the progeny level, and tepa (*Laureliopsis philippiana*), roble (*Nothofagus obliqua*) and olivillo (*Aextoxicon punctatum*) as diverse groups representative of the local forest. All of them planted in cleared strips in "quilantales" (dense *Chusquea quila* formations) of a severely degraded evergreen forest in the province of Valdivia, Chile. With the measurement data, a descriptive analysis of the trial and a statistical evaluation using analysis of variance and multiple comparison of means tests (Tuckey) were carried out to evaluate the effect of planting density and the proportion of intolerant/tolerant species on plant growth and survival, at a significance level of 0.05%. It is concluded that the trial has an overall high survival rate (86.4%). Plants are actively growing, with greater height growth observed in the intolerant or pioneer plants than in the tolerant ones. No effect of treatments on survival was observed ( $p\text{-value} > 0.05$ ), but significant differences in height were detected, particularly for oak and olivillo. In general, treatments with a higher proportion of intolerant pioneer species showed significantly more growth than those with the same proportion ( $p\text{-value} = 0.0003$ ). In any case, the evaluations are early, so it is necessary to conserve and maintain the trial in order to continue with evaluations at more advanced stages of development.

**Key words:** evergreen forest, strip planting, *Chusquea quila* formation, restoration.

## INTRODUCCIÓN

El histórico aprovechamiento del bosque nativo, sin un adecuado manejo, ha provocado el establecimiento de especies como la quila (*Chusquea quila*), bambusacea que forma densas poblaciones que impiden o dificultan la regeneración de las especies arbóreas del bosque. La restauración y enriquecimiento de estos ecosistemas forestales alterados, tendría un impacto social, económico y ambiental muy positivo, ya que incorporaría extensas superficies alteradas y de baja productividad al manejo forestal nacional (González *et al.*, 1997; Alvarez & Lara, 2008).

En tal sentido, la habilitación de fajas en los quilantales y la posterior plantación con especies nativas, constituye una opción apropiada para restaurar o recuperar funciones productivas en los bosques invadidos por quila. La plantación en fajas consta de un diseño longitudinal, de ancho variable, paralelas entre sí, previamente despejadas de vegetación, abiertas al interior del bosque y donde los ejemplares se plantan en una o más hileras (Alvarez & Lara, 2008).

Diversos autores citados por Donoso y Soto (2010), establecen que plantaciones con especies nativas distintas a los *Nothofagus* han sido escasamente estudiadas, aunque reconocen en ellas un interesante potencial productivo y carácter complementario bajo diferentes condiciones de luz. Múltiples especies resultan de interés para el diseño de plantaciones mixtas, que complementen y den un mejor uso al potencial productivo del sitio forestal. Entre ellas los *Nothofagus* coigüe (*N. dombeyi*), raulí (*N. alpina*) y roble (*N. obliqua*) han concentrado la mayor atención debido a su crecimiento y calidad maderera. No obstante, también se reconoce potencial para distintos usos en ulmo (*Eucryphia cordifolia*), avellano (*Gevuina avellana*), así como en Lingue (*Persea lingue*), Laurel (*Laurelia sempervirens*), Tapa (*Laureliopsis philippiana*) y Olivillo (*Aextoxicon punctatum*), como especies complementarias para plantaciones bajo dosel y/o faenas de restauración (Donoso & Soto, 2010).

Plantaciones con mezclas de las especies mencionadas permitirían mejorar la producción potencial del sitio, ya que hacen un uso más eficiente de los recursos (luz, agua, nutrientes). En efecto, un dosel dominante de especies intolerantes y semitolerantes, se complementa con la presencia de especies tolerantes, maximizando así la producción forestal (Kelty, 2006). Sin embargo, investigaciones en torno a diseños, mezclas de especies y manejo cultural deberán ser desarrolladas, ya que es un tópico escasamente desarrollado en Chile (Donoso & Soto, 2010)

En tal contexto, en el presente artículo se evalúa un ensayo de plantación de cinco de las principales especies del bosque siempreverde (ulmo, roble, lingue olivillo y tapa), establecidas como mezclas de distinta proporción de tolerantes e intolerantes y con distintas densidades de plantación, en fajas habilitadas en quilantales de un bosque siempreverde de la provincia de Valdivia (predio Pumillahue, de la Corporación Nacional Forestal). El objetivo de la evaluación es identificar a aquellos tratamientos que resulten más efectivos para garantizar la supervivencia y establecimiento en el largo plazo de la vegetación implantada, y proporcionar así antecedentes iniciales respecto al desempeño, en términos de supervivencia y crecimiento, de las cinco especies bajo un esquema de plantación suplementaria en un bosque siempreverde estructuralmente alterado.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Material

Se evalúa un ensayo de plantación en fajas habilitadas en quilantales del predio Pumillahue en la provincia de Valdivia, Chile (693281m E; 5611013m S; 330 msnm), correspondiente a zonas de bosques del tipo siempreverde, estructuralmente alterados (invadidos por quila) y clasificados por Muñoz *et al.* (2018) entre los mayores grados de degradación (D2 y D3) de los bosques siempreverde (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Categorías de degradación del bosque siempreverde.

Categoría de degradación	Descripción
REF	<b>Bosque de referencia:</b> Bosque multiestratificado, individuos adultos de alturas superiores a 20 metros y amplia cobertura de dosel, presencia de ejemplares emergentes característicos de bosques adultos de baja alteración para este tipo forestal.
D1	<b>Bosque degradado D1:</b> Bosque semialterado, con ausencia de individuos en alguno de los estratos y presencia de claros. Se encuentran individuos jóvenes de diferentes edades regenerándose y estableciéndose, con algún grado menor de afectación por ramoneo de ganado, en la regeneración o sotobosque.
D2	<b>Bosque degradado D2:</b> Bosque con ausencia de individuos en más de algún estrato, generalmente con árboles dominantes residuales de intervenciones anteriores. Presencia de claros con abundante presencia de <i>Chusquea quila</i> . Con algún grado de afectación por ramoneo de ganado, en la regeneración o sotobosque.
D3	<b>Bosque degradado D3:</b> Áreas muy alteradas, producto de talas en que se observan tocones o raíces expuestas, con escasos individuos adultos o bien áreas con una fuerte intervención agropecuaria, donde se observa poca o nula regeneración de individuos jóvenes producto del ramoneo por animales. Abundante presencia de <i>Chusquea quila</i> . Alto grado de afectación por ramoneo de ganado, tanto en la regeneración como sotobosque

(Fuente: Muñoz *et al.*, 2018)

El ensayo contempla las especies principales del bosque siempreverde (**Cuadro 2**) establecidas con consideraciones genéticas en cuanto a la variabilidad del material plantado (número de madres por especie representadas), y generadas a partir de germoplasma obtenido localmente en una ruta semillera habilitada en el mismo predio donde se estableció el ensayo.

**Cuadro 2.** Especies consideradas en ensayo Pumillahue

Clasificación	Especie
Pioneras	Roble ( <i>Nothofagus obliqua</i> )
Intolerantes	Ulmo ( <i>Eucryphia cordifolia</i> )
Finales	Lingue ( <i>Persea lingue</i> )
Tolerantes	Olivillo ( <i>Aextoxicon punctatum</i> )
	Tepa ( <i>Laureliopsis philippiana</i> )

El ensayo tiene un diseño de bloques completos al azar (tres bloques), cada uno en un quilantal distinto, donde se evalúan 6 tratamientos de estructura factorial 3X2, que corresponden a combinaciones de tres distintas densidades de plantación por dos diferentes proporciones de especies pioneras (intolerantes) y finales (tolerantes). El primer factor corresponde a la densidad de plantación, el que se evalúa en tres niveles:

- D1: 666 pl/ha (3x5m).
- D2: 1.111 pl/ha (3X3m).
- D3: 1.667 pl/ha (3x2m).

El segundo factor corresponde a la composición o proporción entre plantas pioneras (intolerantes) y finales (tolerantes). Este se evalúa en dos niveles:

- C1: 50% pioneras / 50% finales.

- C2: 67% pioneras / 33% finales.

Los tratamientos evaluados se resumen en el **Cuadro 3**.

**Cuadro 3.** Tratamientos considerados en ensayo Pumillahue

Tratamiento	Densidad (pl/ha)	Composición (Pioneras/Finales)
T1	666	
T2	1.111	(50/50)
T3	1.667	
T4	666	
T5	1.111	(67/33)
T6	1.667	

## Método

Se evalúa la supervivencia y altura de las plantas al tercer año de establecidas en terreno, complementando la información con los datos registrados al establecimiento y en los años anteriores. Con estos valores se calculó los incrementos de crecimiento en altura después de cada periodo de crecimiento vegetativo en terreno. También se registró el número de plantas vivas para calcular la supervivencia por especie y tratamiento.

Se calculó los valores medios de altura y supervivencia para describir la evolución del ensayo en el tiempo, a nivel general y para cada especie en particular. Se efectuó análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiple (Tuckey) con un nivel de significancia de 0,05% para evaluar el efecto de los tratamientos sobre el crecimiento de las distintas especies a nivel conjunto y para cada una de ellas en forma individual.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados Generales

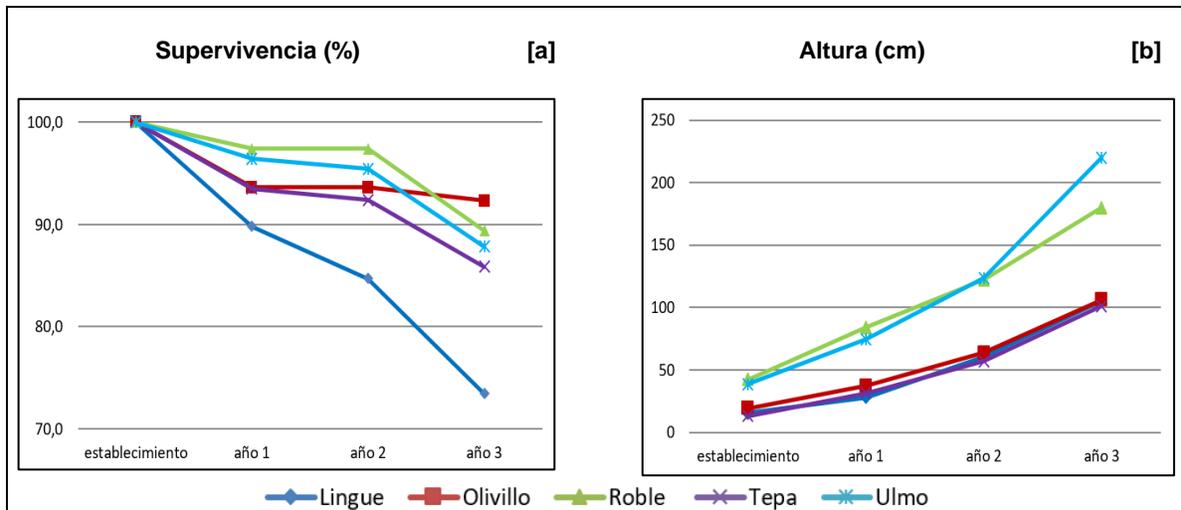
Después de su tercer año de crecimiento en terreno, el ensayo presenta una supervivencia de 86,4%, valor que representa un aumento de mortalidad en el último año mayor al que se había venido observando en los dos años anteriores y que está influenciado por la menor supervivencia que particularmente se ha registrado en el tercer quilantal del ensayo (**Cuadro 4**). A nivel de especies individuales, la supervivencia, la altura media y los incrementos en altura registrados durante los tres primeros años se presentan en el **Cuadro 5** y en los gráficos de la **Figura 1**.

**Cuadro 4.** Evolución de la supervivencia y altura (valores medios de las cinco especies)

Quilantal	Altura [cm]				Supervivencia [%]		
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3
1	28,7	59,8	98,7	166,5	94,1	94,1	90,7
2	30,4	66,2	111,7	185,3	96,5	95,7	92,2
3	31,7	54,5	80,6	128,0	94,0	91,3	76,1
<b>Total</b>	<b>30,3</b>	<b>60,4</b>	<b>97,6</b>	<b>162,3</b>	<b>95,0</b>	<b>93,7</b>	<b>86,4</b>

**Cuadro 5.** Evolución de la supervivencia y altura en el tiempo por especie individual.

Especie	Altura [cm]				Supervivencia [%]		
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 1	Año 2	Año 3
Lingue	15,4	27,9	60,6	105,3	89,8	84,7	73,5
Olivillo	19,1	37,0	63,8	106,1	93,6	93,6	92,3
Roble	42,4	84,2	121,9	179,9	97,4	97,4	89,4
Tepa	13,2	31,3	57,0	101,0	93,5	92,4	85,9
Ulmo	38,5	74,4	123,3	220,1	96,4	95,4	87,8
<b>Promedio</b>	<b>30,3</b>	<b>60,4</b>	<b>97,6</b>	<b>162,3</b>	<b>95,0</b>	<b>93,7</b>	<b>86,4</b>



**Figura 1.** Evolución de supervivencia y altura desde establecimiento hasta el tercer año de crecimiento en terreno para las cinco especies forestales consideradas en ensayo Pumillahue

En términos generales, la supervivencia del ensayo (86,4%) resulta adecuada, siendo comparable con la mencionada por *Donoso & Soto (2010)* para plantaciones de coigüe de 7 años de edad (87%). A nivel de especies individuales, lingue ha presentado la menor supervivencia año tras año y es la que experimenta la mayor reducción de plantas vivas de un año al siguiente, situación que se ha acentuado durante el último periodo (73,5%). Olivillo, tras la mortalidad del primer año ha tendido a mantener una supervivencia constante, exhibiendo en su tercer año el mayor valor de entre todas las especies evaluadas (92,3%). Las restantes especies (ulmo, roble y tepa), han exhibido un nuevo pick de mortalidad en el último año, exhibiendo valores muy similares que fluctúan entre 86 y 89% (**Figura 1-a**).

Los mayores valores de altura corresponden a las especies intolerantes roble y ulmo (180 y 220 cm, respectivamente), las que durante los primeros años presentaban alturas muy similares, y que en el último periodo comienzan a diferenciarse en favor de ulmo, que experimenta el mayor crecimiento y supera a roble. Ambas intolerantes resultan de mayor altura que la tolerantes olivillo, lingue y tepa, las que presentan valores menores y muy similares entre sí (101 a 106 cm) (**Figura 1-b**).

En términos del incremento medio anual (IMA) de altura, los valores del último año equivalen a IMAs de entre 34 y 73 cm/año, destacándose las intolerantes roble y roble por exhibir los valores más altos (60 y 73 cm/año, respectivamente) en comparación a las tolerantes, que presentan valores muy similares entre sí, alrededor de los 35 cm/año (**Cuadro 6**).

**Cuadro 6.** Incremento medio anual de altura por especie al tercer año.

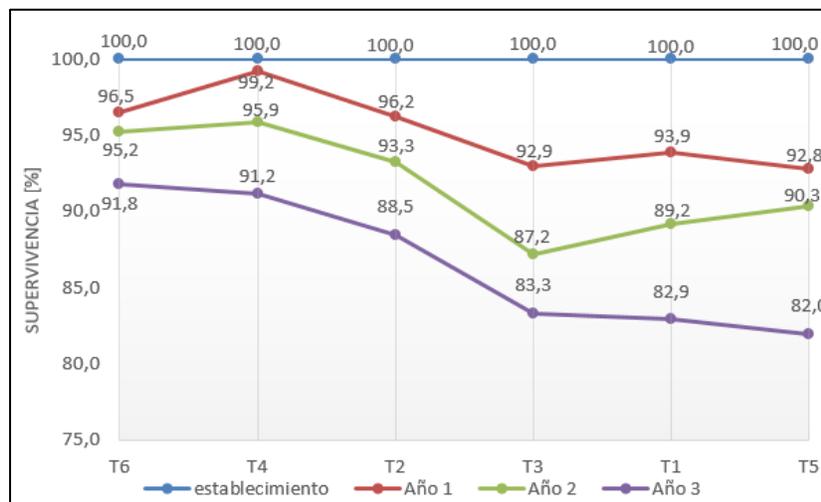
Especie	Altura Año 3 [cm]	IMA [cm/año]
Lingue	105,3	35,1
Olivillo	106,1	35,4
Roble	179,9	60,0
Tepa	101,0	33,7
Ulmo	220,1	73,4

En términos comparativos los IMA observados son coincidentes con los reportados en bibliografía. En el caso de ulmo, [González et al. \(1997\)](#) indican incrementos de altura de 88 cm/año a los cuatro años, ligeramente superiores a los 73 cm/año observados en Pumillahue. Para esta misma especie, en plantaciones de 12 años, sin manejo, efectuadas en Frutillar, [Vita \(1997\)](#) menciona valores de 50 cm/año. En plantaciones de *Nothofagus* intolerantes, de cuatro años, establecidas en San Pablo de Tregua (comuna de Panguipulli, provincia de Valdivia), coigüe registró incrementos medios anuales en altura de 64 cm/año y raulí de 0,54 cm/año ([Alvarez & Lara, 2008](#)), en el caso de roble ([Rocco, 2016](#)) reporta incrementos de 58 cm/año a los 29 años, valores que resultan equivalentes a los registrados por roble en el ensayo de Pumillahue (60 cm/año). También en San Pablo de Tregua, plantaciones de avellano (tolerante) alcanzaron 31 cm/año, valor comparable a los aproximadamente 35 cm/año de las tolerantes evaluadas en Pumillahue ([Alvarez & Lara, 2008](#)). Lingue exhibe crecimientos menores a los reportados en este artículo, alcanzando 20 cm/año en plantaciones efectuadas en Cañete, Provincia de Arauco ([Pinilla et al., 2019](#)).

### Resultados por Tratamiento

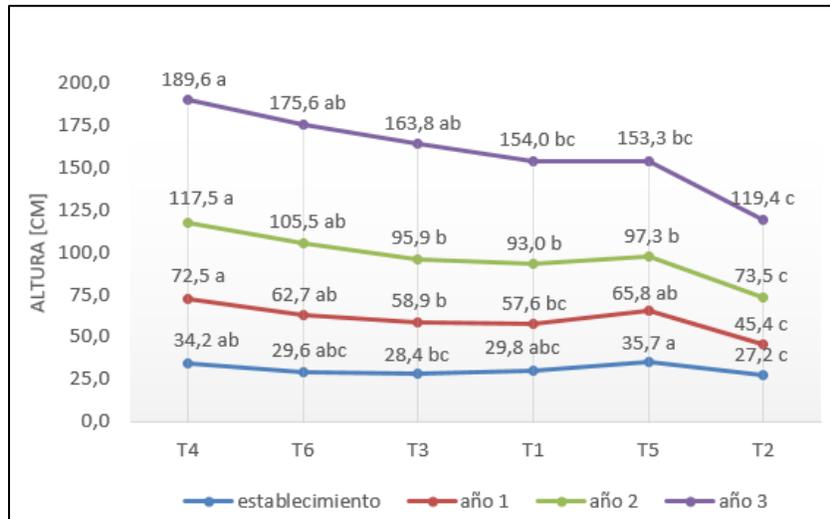
- *Para todas las especies en forma conjunta*

En relación al efecto de los tratamientos, este no resulta significativo sobre la supervivencia que expresan en forma conjunta todas las especies en cada año (**Figura 2**).



**Figura 2.** Efecto de tratamientos sobre la supervivencia de plantas después de tres años de establecidas en terreno (valores conjuntos para 5 especies simultáneamente). No hay diferencias entre tratamientos

El mismo análisis para la variable altura por tratamiento y año se presenta en la **Figura 3**. En este caso el ordenamiento de las medias de altura por tratamiento es similar, diferenciándose el tratamiento T2 como el que produce los menores valores; y el tratamiento T4 como el que produce los mejores resultados. Las diferencias entre tratamientos son estadísticamente significativas dentro de cada año.



Letras iguales en tratamientos del mismo año indican que sus medias no son estadísticamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Figura 3.** Efecto de tratamientos sobre la altura de plantas en los primeros tres años después de establecidas en terreno (valores conjuntos para 5 especies simultáneamente)

A nivel de los factores que componen los tratamientos, tanto la densidad de plantación como la proporción de especies intolerantes/tolerantes tienen efectos significativos sobre la altura total, no obstante, ninguno de ellos afecta a la supervivencia de plantas, la cual resulta ser independiente de los tratamientos empleados, tal como se ilustra previamente en la **Figura 3**.

Respecto al factor densidad de plantación, se observa que la densidad intermedia (1.111 pl/ha) exhibe valores menores de altura total que los obtenidos con las densidades extremas (666 y 1.667 pl/ha) (**Cuadro 7**).

**Cuadro 7.** Efecto de la densidad de plantación sobre la altura y supervivencia (valores conjuntos para 5 especies simultáneamente)

Factor: Densidad	Altura total [cm]	Supervivencia [%]
666 pl/ha	173,8 a	87,5 a
1.667 pl/ha	169,8 a	87,5 a
1.111 pl/ha	135,9 b	84,9 a
<i>p-value</i>	0,0001	0,9835

Medias con letras distintas son significativamente diferentes ( $p \text{ value} < 0,05$ )

En cuanto al factor composición de especies, se constata que los tratamientos en que predominan las especies pioneras o intolerantes por sobre las tolerantes o finales (67/33) obtienen mejores resultados de

altura que aquellos en que ambos grupos de especies están en la misma proporción (50/50). En el **Cuadro 8** se presentan los valores respectivos.

**Cuadro 8.** Efecto del factor proporción de especies intolerantes/tolerantes sobre la altura y supervivencia (valores conjuntos para 5 especies simultáneamente)

Factor: Composición	Altura total [cm]	Supervivencia [%]
67/33	172,1 a	88,0 a
50/50	147,0 b	84,8 a
<i>p-value</i>	0,0003	0,4611

Medias con letras distintas son significativamente diferentes (p value < 0,05)

- *Para todas las especies en forma individual*

A realizar el análisis a nivel de especies individuales, para los datos de supervivencia y altura total de plantas en el tercer año de establecidas en terreno, se confirman las mismas tendencias evidenciadas en el análisis de estas variables en forma conjunta para todas las especies en forma simultánea; es decir, para cada especie particular no se observa efecto de los tratamientos en su supervivencia (**Cuadro 9**), pero se detectan diferencias significativas de altura entre tratamientos para algunas de ellas, particularmente para roble y olivillo (**Cuadro 10**), en ambos casos el tratamiento de peor desempeño es T2, en tanto T4 se presenta entre los de mayor altura.

**Cuadro 9.** Efecto de tratamientos sobre la supervivencia de plantas después de tres años de establecidas en terreno (valores individuales para cada especie por separado)

Supervivencia al 3er año [%]									
Lingue		Olivillo		Roble		Tepa		Ulmo	
Trat	Sup%	Trat	Sup%	Trat	Sup%	Trat	Sup%	Trat	Sup%
T4	93,3 a	T4	100,0 a	T1	100,0 a	T6	94,4 a	T4	100,0 a
T2	83,3 a	T2	100,0 a	T3	91,9 a	T5	91,7 a	T6	96,1 a
T6	83,3 a	T3	95,8 a	T6	91,7 a	T3	88,9 a	T2	92,6 a
T3	66,7 a	T5	88,9 a	T2	87,5 a	T4	83,3 a	T5	83,3 a
T1	66,7 a	T6	83,3 a	T5	85,3 a	T1	80,6 a	T1	83,3 a
T5	56,7 a	T1	77,8 a	T4	81,4 a	T2	77,8 a	T3	74,7 a

Medias con letras distintas son significativamente diferentes (p < 0,05)

**Cuadro 10.** Efecto de tratamientos sobre la altura total de plantas después de tres años de establecidas en terreno (valores individuales para cada especie por separado)

Altura Total 3er año [cm]									
Lingue		Olivillo		Roble		Tepa		Ulmo	
Trat	Altura	Trat	Altura	Trat	Altura	Trat	Altura	Trat	Altura
T6	120,8 a	T4	139,4 a	T3	199,2 a	T4	132,0 a	T4	243,1 a
T3	118,9 a	T5	124,0 ab	T4	194,0 a	T3	113,1 a	T3	239,6 a
T1	102,2 a	T6	117,1 abc	T1	186,5 a	T1	104,8 a	T6	229,3 a
T5	89,1 a	T3	109,6 abc	T6	176,7 ab	T6	103,4 a	T1	209,3 a
T2	85,7 a	T1	92,8 bc	T5	165,3 ab	T5	85,0 a	T5	189,6 a
T4	85,0 a	T2	73,9 c	T2	131,7 b	T2	84,3 a	T2	178,4 a

Medias con letras distintas son significativamente diferentes (p < 0,05)

## CONCLUSIONES

Transcurridas tres temporadas de crecimiento en terreno, el ensayo presenta en general una alta supervivencia (86,4%). Solo la especie lingue exhibe un valor particularmente más bajo (73,5%), en tanto que las especies restantes fluctúan entre 85,9 y 92,3%. Los tratamientos ensayados no evidencian efecto sobre la supervivencia de ninguna de las especies evaluadas.

Las plantas se encuentran creciendo activamente, observándose mayor crecimiento en altura en las intolerantes o pioneras que en las tolerantes o secundarias. La evaluación conjunta de todas las especies indica que los tratamientos evaluados, así como los factores que los componen, afectan significativamente el incremento en altura y la altura total de las plantas, siendo los tratamientos con mayor proporción de especies pioneras intolerantes los que muestran mejor desempeño.

En general, para todas las especies se observa que los tratamientos T4 y T6 están entre los de mejor desempeño, y que el tratamiento T2 es invariablemente el menos apropiado. No obstante, tales diferencias sólo son significativas para la altura total de roble y olivillo.

Atendiendo al aun temprano estado de desarrollo de las plantas, no hay razón para esperar efectos importantes de los tratamientos como consecuencia del factor densidad (competencia) en el desempeño de las plantas. Por el contrario, debido a las distintas estrategias de ocupación del espacio que exhiben las plantas tolerantes e intolerantes, resulta razonable que los tratamientos que involucran mayor proporción de especies intolerantes exhiban en promedio mejor desempeño en el crecimiento en altura que las especies tolerantes, tal como lo confirman los datos analizados.

En cualquier caso, las evaluaciones son tempranas por lo que es necesario conservar y hacer labores de mantención del ensayo para continuar con evaluaciones en estados de desarrollo más avanzados.

## AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Investigación del Bosque Nativo, que financió el proyecto "Evaluación de métodos de plantación suplementaria en bosque siempreverde estructuralmente alterado, promoviendo su variabilidad y sustentabilidad", iniciativa que permitió instalar el ensayo evaluado. A la Corporación Nacional Forestal de la Región de los Ríos, en especial a los Sres. Neftalí Soto y Luis Riquelme por el apoyo brindado en la mantención y medición del ensayo evaluado.

## REFERENCIAS

- Alvarez, C. & Lara, A. (2008).** Crecimiento de una plantación joven en fajas con especies nativas en la Cordillera de Los Andes de la provincia de Valdivia. *Bosque*, 29(3): 181-191. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000300001>
- Donoso, P. & Soto, D. (2010).** Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Revista Bosque Nativo*, N° 47. Pp: 10-17.
- González, M., Donoso, C. & Fraver, S. (1997).** Respuesta inicial de *Eucryphia cordifolia* Cav., *Laurelia sempervirens* R. et P. Tul. y *Aextoxicon punctatum* R. et P. en plantaciones mixtas en sectores recientemente florecidos con *Chusquea quila* Kunth en el centro sur de Chile. *Bosque*, 18(1): 53-59. <https://doi.org/10.4206/bosque.1997.v18n1-07>
- Kelty, M. (2006).** The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest Ecology and Management*, N° 233. Pp: 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.011>

**Muñoz, F., Hasbún, R. & Alarcón, D. (2018).** Guía técnica para caracterizar bosques adultos del tipo forestal Siempreverde degradados y de referencia en las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Guía técnica detallada. FIBN Proyecto 009/2016. Universidad de Concepción. 35 p.

**Pinilla, J., Luengo, K., Navarrete, M. & Larrain, O. (2019).** Análisis del crecimiento y la regeneración en respuesta a tratamientos silvícolas en bosque nativo: alternativas productivas más sustentables asociadas a lingue (*Persea lingue* (R. et P.) Nees ex Kopp. *Ciencia & Investigación Forestal*, 25(3): 67-80. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.521>

**Rocco, R. (2016).** Evaluación de crecimiento de una plantación mixta de *Nothofagus obliqua* y *Gevuina avellana* y una pura de *N. obliqua*. Trabajo de titulación presentado como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Valdivia. 66 p.

**Vita, A. (1977).** Crecimiento de algunas especies forestales nativas y exóticas en el Arboreto del Centro Experimental Forestal Frutillar, X región. Boletín Técnico N° 47. Universidad de Chile. Santiago. 16 p.



ARTÍCULO

## Investigación silvícola y tecnológica de berries nativos de interés comercial en Patagonia: Prácticas de propagación y manejo.

Jaime Salinas Sanhueza<sup>1\*</sup>; Iván Moya Navarro<sup>1</sup> & Alicia Uribe Mora<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, Sede Patagonia, Coyhaique, Chile. [jsalinas@infor.cl](mailto:jsalinas@infor.cl)

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.592>

Recibido: 16.06.2023; Aceptado: 25.07.2023

### RESUMEN

Los bosques nativos de Chile cubren 14,7 millones de hectáreas, se concentran en un 30% en la Región de Aysén y albergan una amplia variedad de productos forestales no madereros (PFNM). La recolección de PFNM es una actividad que genera del orden de 200.000 empleos en zonas rurales y produce exportaciones por más de 80 millones de dólares anuales. En Aysén es una actividad de bajo desarrollo tecnológico, que se realiza bajo importantes imperfecciones de mercado y fundamentalmente sin programas de fomento y control de sus prácticas de cosecha, amenazando así la sostenibilidad de algunos de estos recursos. Sin embargo, se percibe un gran potencial en la puesta en valor de los PFNM regionales, resultando pertinente generar nuevos conocimientos para incrementar el valor económico de los berries nativos de interés comercial y proveer información sobre su propagación, con el fin de propender a su domesticación y cultivo en la región de Aysén. En este contexto se entregan antecedentes de propagación para cuatro especies de berries nativos maqui (*Aristotelia chilensis*), calafate (*Berberis microphylla*), luma (*Amomyrtus luma*) y arrayán (*Luma apiculata*), describiéndose atributos físicos y de germinación de sus semillas, así como resultados preliminares de su propagación vegetativa a través de enraizamiento de esquejes. Se concluye que maqui puede ser multiplicado por enraizamiento, en tanto que las experiencias de germinación y propagación vegetativa en las especies restantes no resultaron exitosas.

**Palabras claves:** Patagonia chilena, Productos forestales no madereros, Maqui.

### SUMMARY

Chile's native forests cover 14.7 million hectares, 30% of which are concentrated in the Aysén Region, and are home to a wide variety of non-timber forest products (NTFPs). NTFP harvesting is an activity that generates around 200,000 jobs in rural areas and produces exports for more than US\$80 million annually. In Aysén, it is an activity of low technological development, which is carried out under important market imperfections and fundamentally without programs to promote and control harvesting practices, thus threatening the sustainability of some of these resources. However, a great potential is perceived in the valorization of regional NTFPs, and it is pertinent to generate new knowledge to increase the economic value of native berries of commercial interest and provide information on their propagation, in order to promote their domestication and cultivation in the Aysén region. In this context, background information on the propagation of four native berry species maqui (*Aristotelia chilensis*), calafate (*Berberis microphylla*), luma (*Amomyrtus luma*) and arrayán (*Luma apiculata*) is provided, describing physical and germination attributes of their seeds, as well as preliminary results of their vegetative propagation through rooting of cuttings. It is concluded that maqui can be multiplied by rooting, while the germination and vegetative propagation experiments on the remaining species were not successful.

**Key words:** Chilean Patagonia, Non Wood Forest Products, Maqui.

## INTRODUCCIÓN

La valoración económica, social, ambiental y patrimonial de los productos forestales no maderos (PFNM) generados por los ecosistemas boscosos es creciente en el mundo, donde el 80% de la población utiliza estos bienes para satisfacer necesidades nutricionales y de salud. Chile posee ventajas significativas en este rubro, producto de una amplia variabilidad climática y diversidad de recursos naturales con altos grados de endemismo, aspectos que hoy dan origen a un amplio y creciente mercado internacional y significativos volúmenes de consumo local. Las exportaciones de productos forestales no madereros durante el año 2018 totalizaron US\$ 87,2 millones (INFOR, 2019).

Los PFNM son definidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, como aquellos bienes de origen biológico, distintos de la madera, procedentes de los bosques, de otros terrenos arbolados y de árboles situados fuera de los bosques; definición que considera bienes de origen animal y vegetal, independientemente de la naturaleza artificial o natural del bosque. Es así como estos productos tienen gran importancia para la economía de las poblaciones rurales, sobre todo las que están estrechamente vinculadas a los bosques y plantaciones forestales.

El Instituto Forestal hace más de 20 años ha estado desarrollando investigación y transferencia de PFNM a lo largo de Chile, con el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible de las personas y los recursos naturales vinculadas a la recolección, procesamiento y comercialización de los PFNM que proveen los ecosistemas boscosos y formaciones xerofíticas del país, mediante la generación y transferencia de información, conocimiento y nuevas tecnologías que generen ganancia en valor. En el año 2017 se crea el Programa de Investigación Silvícola y Tecnológica en PFNM generados en ecosistemas boscosos, la que se encarga de levantar, sistematizar y difundir el conocimiento sobre los PFNM que se asocian a ecosistemas boscosos de Chile, así como su uso, manejo y aprovechamiento por comunidades rurales.

En la Región de Aysén existe una superficie de 4.398.746 ha cubierta por bosques nativos, representado el 29,8% del total nacional (CONAF, 2021). En estos bosques existe una variada cantidad de PFNM y cada uno aporta con diferentes usos, cantidad de oficios, emprendimientos relacionadas con temas productivos, sociales y culturales, contribuyen a las económicas locales y permiten mantener habitadas zonas aisladas como es el caso de esta región.

Entre los PFNM de alto potencial para la zona sur austral de Chile, se encuentran los berries nativos de especies como el maqui, calafate, luma (cauchao) entre otros. En su inicio fueron utilizados para la elaboración de concentrado con fines tintóreos, sin embargo, en los últimos años se han relevado sus propiedades nutraceuticas, por lo que existe una creciente demanda de mercados extranjeros como Japón, Corea del Sur y EEUU.

El presente trabajo de investigación silvícola y tecnológica aporta información sobre berries nativos de interés comercial en Patagonia, para contribuir al conocimiento de prácticas de propagación y manejo que permitan incrementar su valor económico en la Región de Aysén.

## MATERIAL Y MÉTODO

Se trabajó con 4 especies de berries nativos: maqui (*Aristotelia chilensis*), calafate (*Berberis microphylla*), luma (*Amomyrtus luma*) y arrayán (*Luma apiculata*). Individuos de estas especies fueron objeto de una caracterización dendrométrica, y se les usó como fuentes de semillas y propágulos vegetativos para evaluar sus semillas, germinación y factibilidad de propagación vegetativa mediante enraizamiento de esquejes.

### Caracterización Dendrométrica y Morfológica

Se seleccionó tres individuos de cada una de las 4 especies de berries analizadas (maqui, calafate, luma y arrayán) y se les evaluó sus variables dendrométricas. Para el levantamiento de la información se midieron las variables; altura total utilizando Vertex, el DAP con forcípula y se contabilizó el número de

vástagos (**Figura 1**). Se evaluó también parámetros morfológicos de las hojas de maqui (largo y ancho de lámina foliar y longitud de peciolo) en dos sitios de recolección (Mañihuales y Valle Laguna).



**Figura 1.** Medición de parámetros dendrométricos de berries nativos, luma (izquierda) y calafate (derecha).

### Semillas y Germinación

Las semillas de las especies consideradas en este estudio fueron colectadas durante el primer trimestre del año 2020 desde las localidades de la región de Aysén que se detallan en el **Cuadro 1**. Las semillas de cada especie y procedencia fueron envasadas e identificadas con etiquetas, como se muestra en la **Figura 2**.

**Cuadro 1.** Antecedentes de procedencia de semillas colectadas.

	Especies	Procedencia	Ubicación
Maqui	<i>Aristotelia chilensis</i>	Puerto Aysén	45°24'7.15"S - 72°44'38.36"O
Calafate	<i>Berberis microphylla</i>	Nirehuao	45°14'12.27"S - 71°42'35.70"O
Luma	<i>Amomyrtus luma</i>	Lago Riesco	45°23'54.10"S - 72°45'20.13"O
Arrayan	<i>Luma apiculata</i>	Valle Laguna	45°25'39.54"S - 72°35'15.04"O



**Figura 2.** Semillas de berries nativos de izquierda a derecha luma, calafate, arrayan y maqui.

El número de semilla por kilo se determinó mediante norma ISTA (*International Seed Testing Association*) que exige que la muestra de trabajo corresponda a semilla pura, para determinar así el número de semillas constituidas y con capacidad germinativa potencial, eliminando semillas atrofiadas, semillas de otra especie, materia inerte u otras anomalías. Se obtuvo pesando, en una balanza digital, y contando el número de semillas de cuatro muestras de semillas, utilizando para cada una de ellas la fórmula de la **Expresión (1)**

$$NSK (gr) = (NSM / PM) * 1000 \quad (1)$$

Donde;

NSK= número de semillas por kilogramo  
 NSM= número semillas de la muestra  
 PM= peso de la muestra (gr)

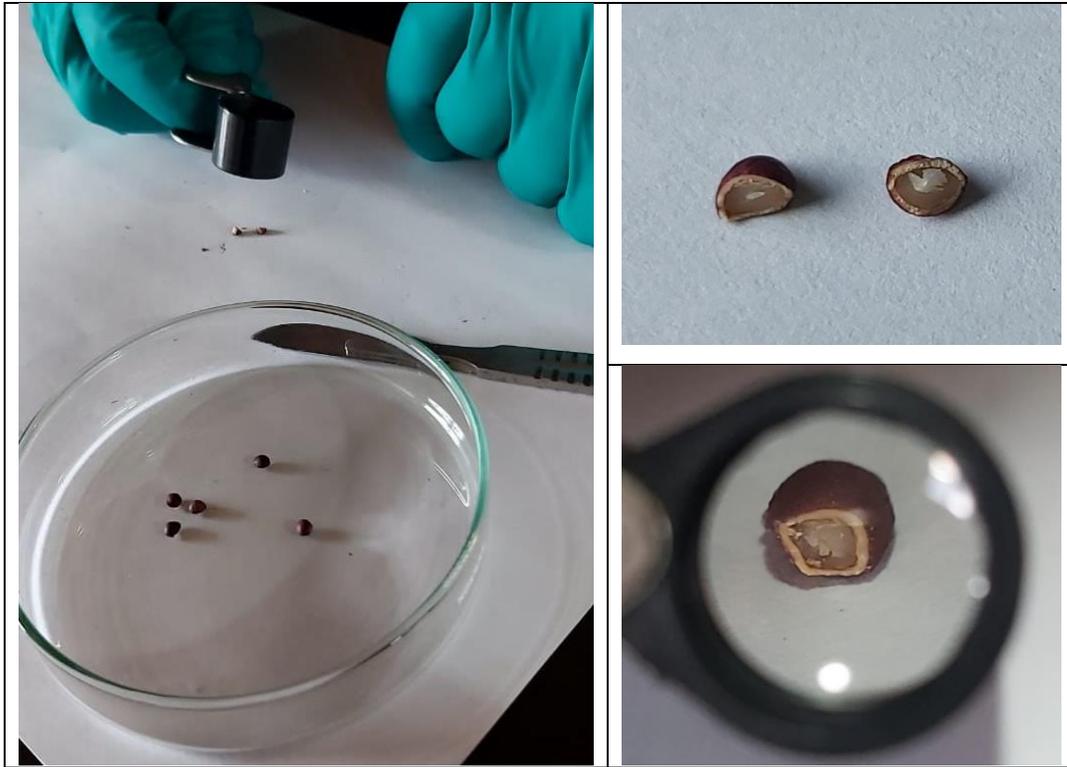
La viabilidad de las semillas se estimó mediante pruebas de flotación y de corte. La prueba de flotación consiste en remojar en agua un número conocido de semillas, de modo que las semillas llenas se van al fondo mientras las semillas vanas quedan flotando. El número de semillas hundidas respecto del total, expresado como porcentaje, es una estimación de la viabilidad del lote de semillas evaluado. Para este efecto se dispuso cuatro repeticiones de 15 semillas de cada especie en frascos plásticos con agua durante 24 hrs. Pasado este tiempo se realizó un conteo del número de semillas flotante y se estimó un porcentaje de viabilidad según la fórmula de la **Expresión (2)**

$$\%V = (NT - NSF / NT) \times 100 \quad (2)$$

Donde;

%V= porcentaje de viabilidad  
 NT= número de muestra total  
 NSF= número de semillas flotantes

La prueba de corte consiste en seccionar semillas con bisturí, cuchillo u otra herramienta apropiada, para posteriormente examinar su contenido a ojo desnudo o bajo una lupa. Las semillas viables lucen firmes, blanquecinas y llenas. Para efectuar esta prueba se tomó cuatro repeticiones de 10 semillas. Se realizó un corte transversal con bisturí y se examinó bajo lupa (**Figura 3**). El número de semilla sanas respecto del total de semillas en cada muestra constituyó la viabilidad de esa muestra, el promedio de las cuatro muestras fue la estimación de viabilidad para el lote de semillas de cada especie.

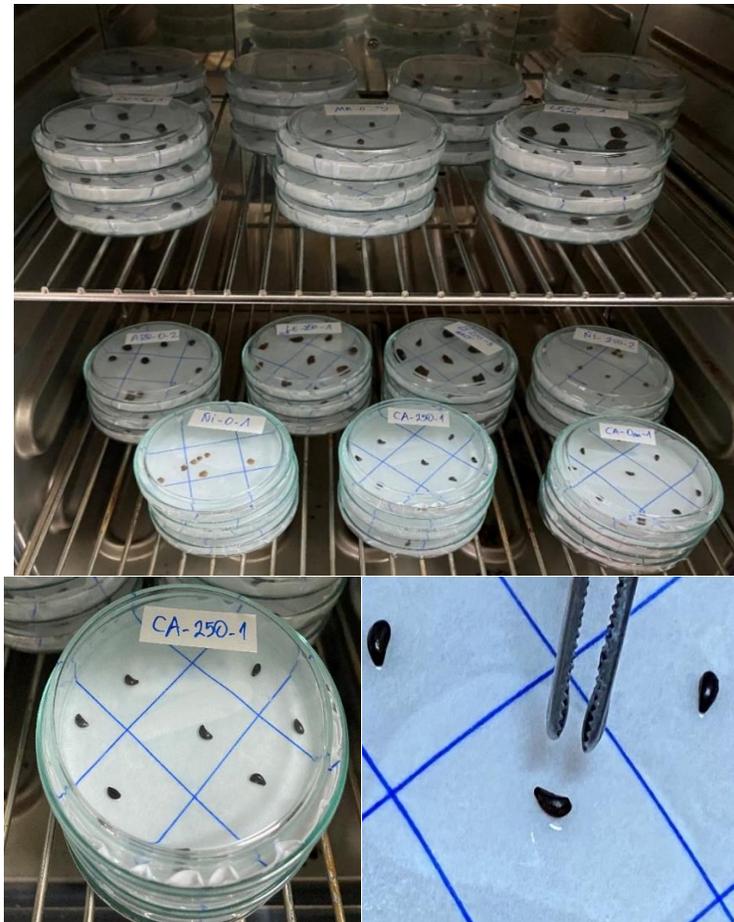


**Figura 3.** Semillas de maqui sometidas a pruebas de corte.

La germinación de las semillas de las cuatro especies evaluadas (maqui, calafate, luma y arrayán) se analizó mediante dos ensayos de germinación montados en laboratorio (**Figura 4**), bajo condiciones controladas en el laboratorio de INFOR en la ciudad de Coyhaique.

El primer ensayo consideró dos tratamientos pregerminativos aplicados a 3 réplicas de 9 semillas de cada especie. Los tratamientos consistieron en remojo en agua destilada y remojo en solución de ácido giberélico ( $AG_3$ ) de 250 mg/L. El segundo ensayo también consideró dos tratamientos pregerminativos, en este caso aplicados a 3 réplicas de 12 semillas de cada especie. Los tratamientos consistieron en remojo de las semillas en soluciones de ácido giberélico ( $AG_3$ ) de 500 mg/L y 1000 mg/L.

En ambos ensayos el tiempo de remojo en los respectivos tratamientos pregerminativos fue de 24 horas. Ambos se establecieron en placas petri con papel filtro humedecido, donde cada placa fue rotulada identificando la especie, procedencia, tratamiento, fecha y número de repetición del lote de semilla. La incubación de las placas se realizó durante 30 días en cámara germinadora, en ausencia de luz, a temperatura constante de 20°C para el primer ensayo y de 25°C para el segundo. Se registró diariamente el número de semillas germinadas siendo estas las que muestran aparición de su radícula con una longitud de al menos 1mm.



**Figura 4.** Ensayos de germinación de semillas de berries nativos remojadas en soluciones con distintas concentraciones de ácido giberélico.

Las curvas de germinación acumulada obtenidas en los ensayos permitieron obtener, mediante la metodología del “máximo de Czabator”, los siguientes parámetros que caracterizan y describen el proceso de germinación: (i) Energía Germinativa (EG), la que corresponde al porcentaje de germinación acumulada diario, obtenido al momento en que la tasa de germinación alcanza su valor máximo; (ii) Período de Energía (PE) correspondiente a la cantidad de días requeridos para alcanzar la tasa máxima de germinación (Cabello *et al.*, 2002); y (iii) Capacidad de Germinación (CG), valor en porcentaje del total de semillas germinadas en el ensayo.

### Propagación Vegetativa

En junio de 2020 se colectó esquejes de material juvenil de tres individuos de maqui, calafate y luma desde los sectores de Valle Laguna (45°34'31" S; 72°29'21" O), Bahía Acantilado (45°23'50" S; 72°46'24" O) y Lago Riesco (45°30'1" S; 72°40'44" O) en la comuna de Aysén. Los esquejes se obtuvieron de la posición sub apical de cada individuo, dimensionado en una longitud promedio de 10 cm  $\pm$  2,0 (Delgado *et al.*, 2008), cortando en forma recta la parte basal y diagonal la terminal, posteriormente fueron sumergidos en agua fría durante su traslado y preparados dentro de las 2 h de la recolección.

Con el material colectado se estableció un ensayo de enraizamiento en un invernadero de tipo túnel con cubierta de polietileno perteneciente al Instituto Forestal en la ciudad de Coyhaique, región de Aysén. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres bloques, donde se evaluó dos

concentraciones de ácido indolbutírico (500 y 2.000 mg/L) más un testigo o tratamiento control (sin hormona). La unidad experimental estuvo constituida por 42 esquejes (**Figura 5**).



**Figura 5.** Proceso de colecta, confección y establecimiento de estacas de maqui para propagación vegetativa. (a) identificación de plantas femeninas de maqui, (b) selección de sección de crecimiento a utilizar, (c) corta y almacenamiento hidratado de la estaca, (d) confección de estaca en laboratorio, (e) aplicación de hormona AIB, (f) instalación en bandejas speedling y sustrato.

Para la confección de los esquejes a enraizar se cortaron todas las hojas de la sección inferior, dejando solo dos hojas en el ápice, cortadas a la mitad para evitar pérdidas por deshidratación. Cada esqueje fue desinfectado mediante su inmersión en una solución con fungicida Captan en concentración de 10 g/L durante 10 minutos previo al tratamiento de estimulación rizogénica.

Para estimular la formación de raíces se utilizó ácido indolbutírico (AIB) en solución alcohólica, a partir de una mezcla comercial (IBA Root Yates®) (Saldías, 2016). Los esquejes fueron expuestos por cinco segundos en las distintas soluciones de AIB y finalmente montados en almacigueras con sustrato a una profundidad de 3-4 cm. Se utilizó almacigueras de aislapol con 84 cavidades de 135 cc de volumen, las que fueron sumergidas en una mezcla del fungicida oxiclورو de cobre con látex- cola fría y agua, lo que permite fijar el sustrato en el envase y actúa, al mismo tiempo, como podador químico de las raíces (Quiroz *et al.*, 2001). El sustrato de propagación consistió en una mezcla de turba con arena volcánica en una proporción volumétrica de 1:1. El riego fue a través de un nebulizador activado manualmente

aplicado una vez al día, con una duración de cada riego de cinco minutos. Una vez por semana se fumigó el ensayo en forma preventiva con una solución del fungicida Captan®. A partir del sexto día se asperjó fertilizante foliar (García et al., 2005). Los ensayos de enraizamiento se iniciaron en el mes de junio y fueron evaluado después de 90 y 150 días de establecidos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

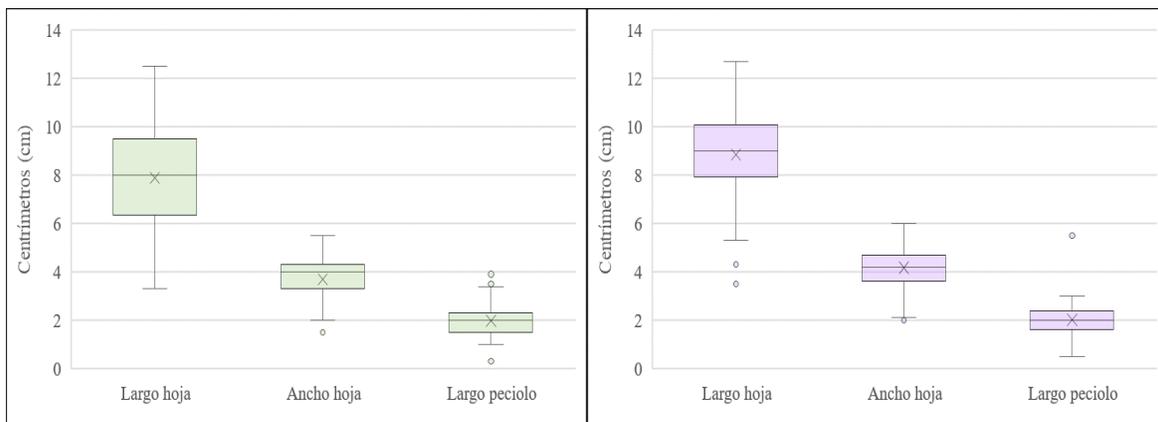
### Caracterización Dendrométrica y Morfológica

Los valores de DAP de los tres individuos de cada especie utilizados como fuente de propágulos para evaluar capacidad de enraizamiento resultaron similares, fluctuando en promedio entre 5,37 y 6,07 cm. En términos de altura luma superó a calafate y maqui, que no sobrepasaron los 4 m. Los valores medios y desviaciones estándar de altura total, DAP y número de vástagos de los individuos analizados se presentan en el **Cuadro 2**.

**Cuadro 2.** Parámetros dendrométricos de individuos seleccionados en la colecta de material vegetativo (promedio ± desviación estándar).

Especies	Ubicación	Individuo	DAP (cm)	HTOT (m)	N° vástagos
Maqui ( <i>Aristotelia chilensis</i> )	Valle laguna	1	4,0	3,0	11
		2	8,0	4,3	10
		3	6,2	4,3	16
		<b>Media ± DE.</b>	<b>6,07 ± 2,0</b>	<b>3,87 ± 0,75</b>	<b>12,33 ± 3,21</b>
Calafate ( <i>Berberis microphylla</i> )	Bahía Acantilada	1	6,3	3,9	7
		2	5,5	3,7	5
		3	4,3	3,7	8
		<b>Media ± DE</b>	<b>5,37 ± 1,01</b>	<b>3,77 ± 0,12</b>	<b>6,67 ± 1,53</b>
Luma ( <i>Amomyrtus luma</i> )	Lago Riesco	1	5,0	5,5	1
		2	7,5	5,4	1
		3	5,5	5,1	1
		<b>Media ± DE</b>	<b>6,00 ± 1,32</b>	<b>5,33 ± 0,21</b>	<b>1,00 ± 0</b>

En el caso de maqui el tamaño de hoja resultó mayor en el sector de Valle Laguna que en el de Mañihuales, en tanto que el largo medio del peciolo no evidencio diferencias entre ambos sitios. (**Figura 6**).



**Figura 6.** Parámetros hojas de maqui del sector de Mañihuales (izquierda) y Valle Laguna (derecha).

## Semillas y Germinación

- *Peso de semillas*

El peso de 1.000 semillas es una variable establecida por las normas internacionales para el ensayo de semillas (ISTA) y sirve para tener una idea del tamaño y viabilidad de estas en una especie determinada. Mientras menor sea el peso de una semilla, más pequeño será su tamaño y más baja su viabilidad (Escobar, 2012). Los resultados de peso de las semillas de berries nativos se resumen en el **Cuadro 3**.

**Cuadro 3.** Parámetros de peso de semillas de berries nativos.

Especies	Peso de 1.000 semillas (g)	Número de semillas por Kg
Maqui ( <i>Aristotelia chilensis</i> )	13,0	76.923
Calafate ( <i>Berberis microphylla</i> )	6,7	149.813
Luma ( <i>Amomyrtus luma</i> )	23,3	42.965
Arrayán ( <i>Luma apiculata</i> )	14,6	68.611

- *Viabilidad de semillas*

Los resultados de viabilidad estimados con pruebas de flotación y corte se presentan en el **Cuadro 4**. En la primera prueba maqui obtuvo la mejor viabilidad de las tres especies evaluadas, sin embargo, en la prueba de flotación su resultado fue el más deficiente, variando significativamente el valor de la viabilidad estimado con cada método (**Cuadro 4**).

**Cuadro 4.** Viabilidad de semillas de berries nativos estimada con pruebas de flotación y corte (promedio  $\pm$  desviación estándar).

Especies	Muestra	% de viabilidad por flotación	% de viabilidad por corte
Maqui ( <i>Aristotelia chilensis</i> )	1	66,7	90,0
	2	60,0	100,0
	3	13,3	100,0
	4	46,7	100,0
	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>46,7 (<math>\pm</math>23,7)</b>	<b>97,5 (<math>\pm</math>5)</b>
Calafate ( <i>Berberis microphylla</i> )	1	60,0	80,0
	2	85,0	90,0
	3	50,0	90,0
	4	55,0	60,0
	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>62,5 (<math>\pm</math>15,5)</b>	<b>80 <math>\pm</math>14,1</b>
Arrayán ( <i>Luma apiculata</i> )	1	95,0	100,0
	2	100,0	100,0
	3	60,0	70,0
	4	95,0	90,0
	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>87,5 (<math>\pm</math>18,5)</b>	<b>90 <math>\pm</math>14,1</b>

- *Germinación de semillas*

Ninguno de los ensayos ni tratamientos evaluados permitió obtener germinación en alguna de las especies evaluadas.

## Propagación vegetativa

El AIB es una de las hormonas vegetales de mayor utilización para estimular la formación de raíces en el cultivo de tejidos y propagación de vegetales, sin embargo, en este estudio el efecto de las distintas concentraciones fue relativamente bajo tanto en formación de callos como en enraizamiento.

En relación a la formación de callo radicular, en maqui se formó en todos los tratamientos evaluados. Por el contrario, en calafate no se observó respuesta a la formación de callo, inclusive en las estacas que enraizaron no se visualizó esta estructura. En luma en la evaluación de 90 días la formación de callo fue nula, mientras que al evaluarlo a los 150 días fue posible observar mayores formaciones de callo en las estacas sin aplicación de AIB (testigo) con un 17,4% de estacas con callo, seguidas del tratamiento 2.000 mg/L (6,3%) y 500 mg/L (3,2%) respectivamente (**Cuadro 5**).

**Cuadro 5.** Formación de callo y enraizamiento en esquejes de berries después de 90 y 150 días de ser tratadas con distintas dosis de ácido indolbutírico.

Especies	Concentración de AIB* (mg/L)	Formación de callo (%)		Enraizamiento (%)	
		90 días	150 días	90 días	150 días
Maqui ( <i>Aristotelia chilensis</i> )	0	100,0	100,0	11,1 ( $\pm 7,2$ )	27,0 ( $\pm 7,3$ )
	500	100,0	100,0	20,6 ( $\pm 9,9$ )	46,0 ( $\pm 24$ )
	2.000	100,0	100,0	<b>55,6 (<math>\pm 5,5</math>)</b>	30,1 ( $\pm 23,5$ )
Calafate ( <i>Berberis microphylla</i> )	0	--	--	--	--
	500	--	--	1,6 ( $\pm 2,8$ )	--
	2.000	--	--	--	--
Luma ( <i>Amomyrtus luma</i> )	0	--	17,4 ( $\pm 2,7$ )	--	--
	500	--	3,2 ( $\pm 2,8$ )	--	--
	2.000	--	6,3 ( $\pm 5,5$ )	--	--

\*Ácido Indolbutírico

En cuanto al enraizamiento, en el caso de maqui la mayor proporción fue de 55,6% y se obtuvo a una concentración de 2.000 mg/L de AIB (90 días), sin observarse un aumento de enraizamiento cuando se evaluó a los 150 días, ocasión en que se observó solo un 30,1% de formación de raíces. Al utilizar una concentración de 500 mg/L, si se observó un efecto del tiempo en la formación de raíces, pasando de 20,6% a los 90 días, hasta un 46% a los 150 días. El enraizamiento también se manifestó en las estacas testigos sin AIB, aunque en un porcentaje algo inferior al de las estacas tratadas con regulador de crecimiento (**Cuadro 5**).

En el caso de luma no fue posible obtener resultados positivos de enraizamiento con ninguno de los tratamientos, situación muy similar ocurrió en calafate donde solo el tratamiento de 500 ppm de AIB logro un efecto marginal de 1,6% de enraizamiento (**Cuadro 5**).

## CONCLUSIONES

Los resultados de germinación y propagación vegetativa indican que los berries nativos, presentan algunas dificultades para su multiplicación con los tratamientos y procedimientos evaluados.

Respecto a la reproducción por semillas, la aplicación de diferentes concentraciones de ácido giberélico (250 mg/L; 500 mg/L y 1.000 mg/L), provocó nulo efecto en la germinación de semillas. Es necesario seguir ahondando en este tipo de estudios, considerando otros tratamientos pregerminativos y germoplasma de otras procedencias.

En cuanto a la multiplicación vegetativa, entre todos los berries evaluados, maqui fue la especie que presentó la mayor respuesta, pudiendo formar callos y enraizar con las dos concentraciones de AIB

evaluadas (500 y 2.000 mg/L de AIB), incluso en el testigo sin aplicación del regulador de crecimiento. No obstante, en las especies restantes las experiencias de enraizamiento no fueron exitosas bajo los tratamientos utilizados.

Es necesario seguir investigando en técnicas de propagación, con el fin de generar y validar protocolos que permitan reproducir y masificar berries nativos que presentan un alto interés comercial, por cuanto la domesticación de estos berries generaría un impacto ambiental positivo en las formaciones naturales.

## REFERENCIAS

- Cabello, A., Sandoval, A. & Carú, M. (2002).** Efecto de los tratamientos pregerminativos y de las temperaturas de cultivo sobre la germinación de semillas de *Talguenea quinquenervia* (talguén). *Ciencias Forestales*, 16(1-2): 11-18.
- CONAF. (2021).** Superficies de uso de suelo regional actualizado a Julio 2021. En: <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/> (Consulta: julio, 2023).
- Delgado, M., Cuba, M., Hechenleitner, P. & Thiers, O. (2008).** Propagación vegetativa de taique (*Desfontainia spinosa*) y tepa (*Laureliopsis philippiana*) con fines ornamentales. *Bosque*, 29(2): 120-126. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000200004>
- Escobar, R. (2012).** Semillas. En: *Producción de Plantas en Viveros*. Consejo Federal de Inversiones – CIEFAP. 1ra Edición. Buenos Aires. 190 p.
- García, R., Vargas, J., Cetina, V. & Villegas, A. (2005).** Efecto del ácido indolbutírico (AIB) y tipo de estaca en el enraizamiento de *Gmelina arborea* Roxb. *Revista Fitotecnología*, N° 20. Pp: 319-326. <https://doi.org/10.35196/rfm.2005.4.319>
- Instituto Forestal (2019).** Boletín de Productos Forestales no Madereros (PFNM) N° 35. Santiago, Chile. 28 p.
- Quiroz, I., Flores, L., Pincheira, M. & Villarroel, A. (2001).** Manual de viverización y plantación de especies nativas zona centro sur de Chile. Instituto Forestal. Valdivia, Chile. 159 p.
- Saldías, G. (2016).** Propagación vegetativa por esquejes de *Monttea chilensis* Gay. *Gayana Botánica*, 73(1), 25-31. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432016000100004>





---

APUNTE

## **Informe de Gira Técnica: Utilización de técnicas nucleares para mejorar la adaptación y la productividad de especies forestales frente al cambio climático.**

Patricio Rojas Vergara<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, sede Metropolitana

\*Autor para correspondencia (arial 8)

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.587>

Recibido: 05.11.2022; Aceptado: 10.01.2023

---

### **RESUMEN**

El Instituto Forestal (INFOR), con financiamiento de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), con sede en Viena, Austria, y el apoyo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares de México (ININ) está desarrollando el proyecto CHI5052 Utilización de Técnicas Nucleares para Mejorar la Adaptación y la Productividad de Especies Forestales Frente al Cambio Climático.

Dentro del marco del proyecto indicado el autor, investigador de la línea de investigación Conservación y Mejoramiento Genético de INFOR, realizó en el mes de mayo de 2022 una gira técnica a México durante la cual visitó el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chapingo y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con el objeto de conocer los avances en la aplicación de las tecnologías nucleares para enfrentar los efectos del cambio climático en los bosques nativos y exóticos.

En el presente documento se describen las instituciones mexicanas y sus actividades relacionadas al tema del proyecto CHI5052.

**Palabras clave:** Técnicas nucleares, Adaptación, Productividad, Especies forestales.

### **SUMMARY**

The Forest Institute (INFOR), with financing from the International Atomic Energy Agency (IAEA), based in Vienna, Austria, and the support of the Chilean Nuclear Energy Commission (CCHEN) and the National Institute of Nuclear Research of Mexico (ININ) is developing the project CHI5052 Use of Nuclear Techniques to Improve the Adaptation and Productivity of Forest Species to face the Climate Change.

Within the framework of the indicated project, the author, a researcher in INFOR's Conservation and Genetic Improvement research line, made a technical tour to Mexico in May 2022 during which he visited the National Institute for Nuclear Research (ININ), the National Forestry Commission (CONAFOR), the Protector of Forests of the State of Mexico (PROBOSQUE), the National Institute of Forestry and Agricultural Research (INIFAP), the Autonomous University of Chapingo and the Michoacana University of San Nicolás de Hidalgo, in order to know the advances in the application of nuclear technologies to face the effects of climate change in native and exotic forests.

This document describes the Mexican institutions and their activities related to the theme of the project CHI5052.

**Keywords:** Nuclear techniques. Adaptation and productivity of forest species.

---

## INTRODUCCIÓN

El Instituto Forestal (INFOR), con financiamiento de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), con sede en Viena, Austria, y el apoyo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares de México (ININ) está desarrollando el proyecto CHI5052 Utilización de Técnicas Nucleares para Mejorar la Adaptación y la Productividad de Especies Forestales Frente al Cambio Climático.

Dentro del marco del proyecto indicado el autor, investigador de la línea de investigación Conservación y Mejoramiento Genético de INFOR, realizó en el mes de mayo de 2022 una gira técnica a México durante la cual visitó el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chapingo y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con el objeto de conocer los avances en la aplicación de las tecnologías nucleares para enfrentar los efectos del cambio climático en los bosques nativos y exóticos.

El objetivo del proyecto es mejorar el establecimiento y la productividad de los árboles forestales incrementando su capacidad de resistencia a la sequía y a la aparición de enfermedades mediante el uso combinado de irradiación y biología molecular. Dentro de proyecto INFOR recibió la donación de un completo laboratorio de biología molecular, cuyo establecimiento se está completando en la Sede Bio Bio de la institución, y ya se han realizado algunas evaluaciones de germinación de semillas de árboles forestales sometidas a bajas dosis de radiación gamma.

Se considera que México lidera las investigaciones a nivel latinoamericano en diferentes ámbitos de la aplicación de tecnologías nucleares, como salud, alimentos y agricultura, y actualmente en el área forestal. El itinerario contempló visitas a laboratorios relacionados con el empleo de la biotecnología para propagación in vitro y de tecnologías nucleares como la irradiación gamma (hórmesis y mutagénesis) en semillas y otros materiales vegetativos para mejorar la germinación y el crecimiento de las especies nativas para enfrentar y mitigar los efectos del cambio climático en ecosistemas nativos y plantaciones forestales.

ININ México y CCHEN Chile han tenido una estrecha colaboración en investigación sobre aplicación de Técnicas Nucleares en Agricultura y Alimentación desde hace 7 años, lo que ha propiciado el intercambio de diversas visitas científica de investigadores de uno y otro país en el marco de esta colaboración desde el año 2014. La experiencia sobre radio hórmesis generada en México en pinos, puede aplicarse a eucaliptos, así como a otras especies forestales, ampliado el ámbito de aplicación tanto en materia de especies como de hábitat, generando información científicamente innovadora.

Uno de los postulados fundamentales de los proyectos de cooperación técnica del IAEA se orienta a que los países participantes busquen la sostenibilidad de los proyectos, por lo que la colaboración ININ-CCHEN-INFOR a través de la formulación de proyectos conjuntos constituye una opción viable para la continuidad de la línea de investigación relativa al estudio de la aplicación de las técnicas nucleares en la agricultura y alimentación, los cuales podrían ser postulados a *entidades internacionales*, como FAO, IAEA, AMEXCID (Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo).

## OBJETIVOS DE LA GIRA TÉCNICA

- Conocer los avances que se tienen en México sobre la aplicación de técnicas nucleares en la producción de especies forestales desde el punto de vista hormético y de inducción de variabilidad.
- Intercambiar experiencias sobre aplicación de técnicas nucleares en el área forestal aplicadas a la conservación y mejoramiento genético, así como a la producción intensiva de especies forestales.
- Propiciar la elaboración conjunta de proyectos de investigación sobre aplicación de técnicas nucleares en agroforestería para someterlos a entidades internacionales.

## ORGANIZACIONES E INVESTIGADORES VISITADOS

En los puntos siguientes se resumen las visitas a las distintas organizaciones mexicanas, los contactos con investigadores y los temas tratados.

### **INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES (ININ). OCOYOACAC, ESTADO DE MÉXICO**

Esta visita tuvo como fin conocer las instalaciones y equipos, y las actividades que se realizan en relación al fitomejoramiento con énfasis en el mejoramiento de árboles forestales (*Abies religiosa* y *Prosopis spp.*), y realizar una práctica de irradiación en equipos Gamacell 220, para pruebas de radiosensibilidad.

Se sostuvo reuniones de trabajo con el equipo de investigación de INN relacionado con las tecnologías nucleares; Dr. Luis Robledo Arratia, Biól. Josefina González Jiménez, M C. Juan Manuel García Andrade y Dr. Eulogio de la Cruz, y se expuso el proyecto en desarrollo en Chile CHI5052.

Entre las instalaciones de investigación del ININ visitadas fue posible conocer:

- Laboratorio de Fitomejoramiento
- Invernadero
- Laboratorio de Biología Molecular
- Laboratorio de propagación de plantas de *Abies religiosa* y *Prosopis spp.* en el Departamento de Irradiación Gamma.

Entre las posibilidades de colaboración discutidas surgió la de generar un Proyecto Regional relacionado con la aplicación de tecnologías nucleares en el mejoramiento genético forestal para mejorar la tolerancia a la sequía, pestes y enfermedades de los ecosistemas nativos frente al cambio climático, para el cual se buscaría financiamiento en diferentes fuentes internacionales.

Se conversó con la Biól. Josefina Gonzalez la posibilidad que ININ colabore en la determinación del LD30 y LD50 de las especies *Eucalyptus globulus* y *Quillaja saponaria* incluidas en el programa de mutagénesis diseñado por el Dr. Brian Forster, experto del IAEA en el proyecto CHI5052. Para esto se considera enviar las semillas para que sean irradiadas en ININ.

En la visita al Laboratorio de Fitomejoramiento y Propagación de Plantas se pudo observar el trabajo de mejoramiento genético por mutagénesis en oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham) y la evaluación de diferentes dosis de radiación gamma (1, 3 y 5 Gy) para evaluar el efecto morfológico en las plantas irradiadas. El color y disposición de las ramas y las acículas demuestran el efecto de la radiación. *Abies religiosa* es una especie de gran importancia económica, sobre todo como ornamental (árboles de navidad). De la misma se obtiene la trementina, que posee valor medicinal, y la corteza de árboles viejos es utilizada para carbón.



**Figura 1.** Plantas mutantes M1 de *Abies religiosa* con diferentes dosis de radiación gamma (1,3,5 Gy) evaluadas a los 3 meses de edad y con morfologías de ramas y acículas diferentes a la especie pura (izquierda) y plantas mutantes M1 de *Dracaena* (*Sansevieria*) planta de uso ornamental(derecha).

Respecto de observaciones al proyecto CH5052:

- Las aplicaciones de la radiación gamma pueden ser en forma de semillas o *in vitro*, siendo esto último de mejor resultado por cuanto puede capturar el total de la heredabilidad genética (varianza genética aditiva y no aditiva).
- La dosimetría semiletal LD30 y LD50 puede estar asociada al material genético específico (ejemplo, la procedencia geográfica de la colecta de la semilla, la familia o el clon).
- Una vez determinada la LD30 y LD50 de las especies *Eucalyptus globulus* y *Quillaja saponaria*, ¿será necesario determinar por separado la dosimetría de los 10 clones elite de la primera especie y los 2 de la segunda?

El cultivo de tejidos comprende la micro propagación, el aislamiento y cultivo de embriones, la regeneración a partir de callo o de suspensiones celulares, el cultivo de protoplastos, anteras y microesporas. Estas técnicas se están utilizando en particular para la multiplicación de plantas en gran escala. La micro propagación ha resultado especialmente útil en la producción de material mutagénico.



**Figura 2.** Plantas *in vitro* a ser sometidas a diferentes dosis de radiación gamma .

El estudio de radio sensibilidad consiste en someter a un organismo (material vegetal, como semillas, polen, cultivo *in vitro*) a dosis crecientes de radiaciones gamma con la finalidad de evaluar su efecto en diferentes variables de desarrollo de las plantas, como por ejemplo supervivencia, rango de dosis que induce efecto de hórmesis, dosis letal media LD50, así como dosis que inducen reducción en crecimiento LD30. El estudio de radio sensibilidad puede efectuarse a través de la evaluación de caracteres morfológicos externos, sin embargo, debido a que no todas las mutaciones en el ADN son expresadas a

través del fenotipo, el uso de marcadores moleculares permite visualizar diferencias tangibles entre secuencias de plantas mutadas.

Los rayos gamma y los rayos X son los más empleados en mejoramiento. Sin embargo, no basta seleccionar el tipo de radiación a usar, deben tomarse en cuenta otros factores como radiosensibilidad, intervalo de dosis y forma de aplicación, para lograr los objetivos planteados. Para explicar estos factores, se debe entender qué es una dosis de radiación. Se entiende por dosis la cantidad de energía absorbida por el material irradiado, la cual se mide en unidades llamadas grays.

El Gammacell 220 es un irradiador de investigación totalmente autónomo, diseñado para proporcionar un campo de irradiación gamma de alta intensidad. No se necesitan requisitos de blindaje adicionales para operar la unidad de manera segura. Se pueden proporcionar tasas de dosis de exposición de hasta 2,0 x 10<sup>6</sup> roentgens por hora en el punto medio de la cámara de irradiación con una fuente de carga nominal de 23.000 curies de cobalto-60.

Componentes del Gammacell 220:

- Escudo de radiación: El escudo de radiación consiste en una gran barrera de plomo revestida de acero con provisión para albergar la fuente de cobalto.
- Fuente radiactiva: La fuente Cobalto 60 consta de hasta 48 elementos de fuente lineal espaciados equitativamente en un bastidor de acero inoxidable para formar una capa cilíndrica radiactiva o anillo de 8¼ pulgadas (20,9 cm) medido entre los centros de los elementos opuestos. Cada elemento lineal consta de un lápiz de acero inoxidable soldado lleno de Cobalto-60 en forma de cobalto metálico.
- Cajón: El cajón está ubicado en el centro del escudo de radiación y es accionado eléctricamente en forma vertical a través del centro de la fuente. El material a irradiar se coloca en la cámara de muestra, luego se baja a la posición de irradiación, es decir, la cámara de muestra está en el centro de la fuente.



**Figura 3.** Práctica de irradiación en equipos Gamacell 220, para pruebas de radiosensibilidad en plantas de cultivo *in vitro* y semillas.

Respecto de observaciones para el proyecto CH5052:

- Qué variable se considerará para las dosis semiletales de radiación gamma: ¿La germinación a 12-14 días, la supervivencia a 30 días o la supervivencia de las plantas a 60 días?

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES Y AGROPECUARIAS (INIFAP), Coyoacán, Ciudad de México**

Se visitó el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF-INIFAP), con el objeto de intercambiar conocimientos sobre técnicas de cultivo *in vitro* aplicadas a la mejora de especies forestales mediante mutagénesis radioinducida, y realizar una práctica relacionada con el cultivo *in vitro* sumergido de especies forestales (*Prosopis spp*). Equipo: Sistema de inmersión temporal RITA®

El trabajo más relevante desarrollado en INIFAP ha sido la investigación que se detalla a continuación:

**Castillo Martínez, C. R.; García Campusano, F.; Vallejo Reyna, M.; Reyes Martínez, I. y de la Cruz Torres, E. (2018).** Mutagénesis de Material *In Vitro* de *Pseudotsuga Menziesii* y Obtención de Líneas Mutantes.

Su objetivo fue generar líneas mutantes de menor porte de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), partiendo de material seminal y vegetativo expuesto a diferentes dosis de rayos gamma.

Se empleó un diseño completamente al azar, se irradiaron con una fuente de rayos gamma semillas y embriones aislados de *P. menziesii*, se determinó la DL50 para cada tipo de tejido 15 y 18 Gy, respectivamente. Se irradió un total de 750 explantes, se evaluó su crecimiento a los 60 días seleccionando los individuos que mostrara una reducción del crecimiento mayor al 30% para poder multiplicar las líneas *in vitro*, se evaluó el medio óptimo recomendado para la especie con la combinación de dos reguladores de crecimiento y tres concentraciones para determinar cuál generaba el mayor número de brotes por explante. El crecimiento se midió y se comparó con respecto al testigo por la prueba de Tukey a un nivel del 5% de confianza.

Se encontró que la dosis de 12 Gy en tejidos vegetativos propagados *in vitro* permite generar mutaciones que pueden dar origen, según el objetivo de la selección a líneas mutantes de interés, para este estudio fue la reducción del crecimiento, se logró seleccionar tres líneas mutantes y determinar un medio para multiplicar las líneas generadas.

Limitaciones del estudio y observaciones respecto del CHI5052:

- Los programas de mejoramiento genético en especies forestales deben ser proyectados a largo plazo, las mutagénesis son aleatorias, además de generar quimeras que pueden dificultar la fijación del carácter seleccionado.

**PROTECTORA DE BOSQUES DEL ESTADO DE MÉXICO (PROBOSQUE)**

Esta visita tuvo por objeto analizar rasgos cuantitativos y cualitativos a tener en cuenta durante experimentos de mutagénesis radioinducida y efectuar una práctica de evaluación de caracteres morfológicos de *Pinus spp* sometidos a irradiación gamma *in situ*.

Se sostuvo reuniones con autoridades e investigadores de PROBOSQUE ([http://probosque.edomex.gob.mx/acerca\\_probosque](http://probosque.edomex.gob.mx/acerca_probosque)). Para el Estado de México preservar el entorno ecológico es una prioridad, por ello la voluntad de fortalecer la participación social en la tarea de conservar y desarrollar los recursos forestales es el motivo del actuar de PROBOSQUE, que mediante sus áreas operativas se orienta a un solo objetivo que es lograr el desarrollo forestal sustentable de la entidad. PROBOSQUE es un Organismo Público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio, creado en 1990 y sectorizado a la Secretaría del Campo a partir del 29 de septiembre de 2020. Actualmente cuenta con el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de México 2005 - 2025, plan rector del sector con planeación a corto, mediano y largo plazo.

La visita incluyó laboratorios, el banco de germoplasma de especies forestales, ensayos de introducción de especies y el programa de mejoramiento genético forestal pertenecientes a PROBOSQUE.



**Figura 4.** Vista general de los viveros de producción de plantas de semillas de *Pinus* spp y banco de germoplasma.

- En la década de los noventa, fueron establecidas 15 áreas semilleras de *Pinus pseudostrabus*, *Pinus montezumae*, *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, principalmente, y también 28 huertos semilleros sexuales de *Pinus pseudostrabus*, *Pinus montezumae*, *Pinus greggii* y *Pinus teocote*.
- Posteriormente 2 Huertos semilleros clonales de *Pinus patula* y *Pinus greggii*
- Respecto de ensayos de introducción de especies, fueron probados *Pinus patula*, *Pinus greggii* y *Pinus pseudoestrobis* y en eucaliptos (2013) *Eucalyptus nitens* (procedencia Monteaguila, Chile), *Eucalyptus saligna* (procedencia SAPPI, Sudáfrica), *Eucalyptus macarthurii* y *Eucalyptus regnans*.



**Figura 5.** Ensayo de introducción de especies *Eucalyptus saligna* (izq.), Huertos semilleros clonales de *Pinus* spp (der.).

El sistema RITA® nutre y oxigena los cultivos de plantas mediante inmersión intermitente de un medio de cultivo líquido. El recipiente con un volumen de 0,9 L suspende los cultivos mediante un disco de tipo cesta.

Al bombear aire filtrado estéril a baja presión a la cámara, hace que el medio líquido se dirija hacia arriba y bañe el cultivo.

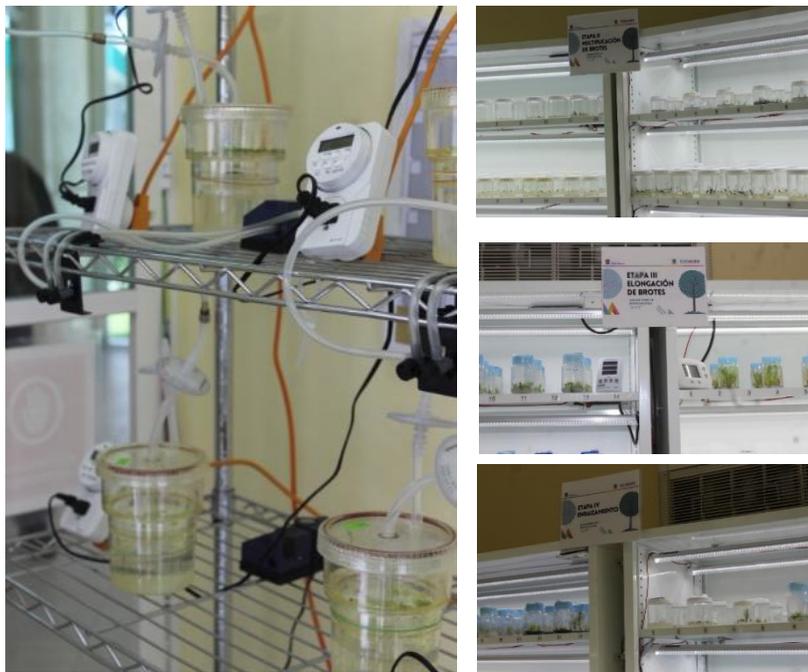
El flujo de aire oxigena y agita el medio. Cuando se apaga el flujo, la presión cae y el medio regresa al fondo del recipiente.

Todos los componentes son esterilizables en autoclave y reutilizables.

Usando válvulas de solenoide y colector, una bomba de aire puede operar varios recipientes automáticamente.

El sistema de inmersión temporal RITA® para cultivo de plantas *in vitro* asegura mejores rendimientos en comparación con el cultivo en un medio de gel.

- Manipulación sencilla de plantas y medios
- Nutrición mejorada: la planta está en estrecho contacto con el medio durante el proceso de inmersión
- La planta está cubierta por una película capilar (Polisulfona) durante el período restante de su inmersión.
- Marcada reducción de la asfixia
- Renovación completa de la atmósfera cultural en cada inmersión
- Control de procesos morfológicos modificando la frecuencia y duración de la inmersión



**Figura 6.** Sistema RITA®. Etapas del cultivo *in vitro*. I. Germinación. II. Multiplicación de Brotes. III Elongación de brotes. IV Enraizamiento.

## COMISIÓN NACIONAL FORESTAL CONAFOR

Objetivo de la visita fue intercambiar experiencias con los productores de la Reserva Forestal Multifuncional sobre producción forestal comercial, reducción de la deforestación, diversificación de productos como madera, aceites, árboles de navidad, conservación de suelos, captura de carbón, plantas

medicinales y sustentabilidad. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) fue creada por decreto presidencial el 4 de abril del 2001, es un Organismo Público Descentralizado cuyo objetivo es desarrollar, favorecer e impulsar las actividades productivas, de conservación y restauración en materia forestal, así como participar en la formulación de los planes, programas y en la aplicación de la política de desarrollo forestal sustentable.

### Reserva Forestal Multifuncional CONAFOR, Puebla.

Se conoció prácticas relativas a la conservación de la biodiversidad en bosques bajo gestión sostenible. Plantación de *Pinus montezumae* en curvas de nivel después de la cosecha. Los ejidos (comunidades y pymes forestales) están muy involucrados en las buenas prácticas para el manejo sustentable del bosque nativo mejicano, el recurso hídrico (instalación de gaviones), el cuidado de la regeneración de los bosques y la protección de la erosión (plantación en curvas de nivel)



Figura 7. Plantación de *Pinus montezumae* en curvas de nivel en Puebla.

### Bosque de Niebla, Michoacán

En las regiones montañosas del centro de México, existe un tipo particular de bosque muy diverso y complejo, reducto de grandes bosques anteriores a las glaciaciones, que ha sido definido por investigadores como una selva bajo un bosque templado, de gran humedad ambiental y que entre otros nombres ha sido denominado Bosque de Niebla, el cual presenta una extraordinaria biodiversidad y belleza.

### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, ESTACIÓN FORESTAL ZOQUIAPAN

Se visitó la estación forestal experimental donde se evalúa la influencia de la cobertura, la pendiente y la profundidad en el carbono y el nitrógeno del suelo, con el objetivo de promover la sostenibilidad y se compartió con investigadores de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo en esta estación experimental.

Se conoció prácticas sobre la influencia de la cobertura, la pendiente y la profundidad, sobre el carbono y el nitrógeno del suelo en parcelas forestales y se pudo apreciar que en estos ecosistemas nativos el cambio climático tiene un efecto en la aparición de insectos que afectan la supervivencia de los árboles, situación similar a lo que ocurre con el bosque nativo chileno.

Se visitó también un campo experimental donde se evalúa la diversidad genética de *Eucalyptus* y se pudo compartir conocimientos sobre el mejoramiento genético de especies de este género.

Se sostuvo reuniones con investigadores de la División de Ciencias Forestales de la Universidad de Chapingo, Chapingo México, se conoció ensayos de injertación de *Pinus* en invernaderos y algunas prácticas de evaluación de la diversidad de especies de *Pinus* en *Arboretum* del Campo Experimental, Chapingo.



**Figura 8.** Visita a Universidad de Chapingo.

Finalmente se participó en un encuentro con investigadores del posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Montecillo, se presentó el proyecto CHI5052 y se tuvo la oportunidad de intercambiar opiniones sobre este.

**IAEA**  
International Atomic Energy Agency

National Project Document Template  
Country Name CHILE  
Priority No. CH2018005

**Nuclear techniques to improve the adaptation and productivity of forest species facing climate change**

**INFOR**

**Objetivo General**  
Contribuir a bosques saludables y sostenibles en el marco de la Política Forestal Chilena (2015-2035)

**Objetivo Específico**  
Mejorar la productividad y adaptabilidad de las especies forestales afectadas por el cambio climático.

**PRODUCTOS**

- Recursos humanos capacitados en técnicas nucleares y en selección genética asistida para el mejoramiento de árboles.
- Incorporación de nueva tecnología para la generación de nuevo material genético.
- Obtención de semillas y clones adaptados al cambio climático

**Figura 9.** Presentación de proyecto CHI5052 en Colegio de Postgraduados de Montecillo.

## VISITA A PURHÉPECHA PLATEAU, MICHOACAN

Se realizó una visita de campo sobre Ecosistemas Forestales y Manejo Ambiental Sustentable en los Bosques Templados Lluviosos de la Meseta Tarasca en el Estado de Michoacán con productores de la región e investigadores del INIFAP.

Se revisaron las estrategias para promover el desarrollo forestal a través de las políticas gubernamentales en Michoacán.

Se visitó también la Comisión Estatal Forestal de Michoacán (COFEM). Con el propósito de obtener información sobre estrategias de caracterización, conservación y mejoramiento de árboles forestales en el altiplano Purhépecha se visitó el Tecnológico Nacional. Campus Purhépecha, y se sostuvo encuentros con autoridades e investigadores de este campus.

## UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Se visitó la Facultad de Agrobiología UMSNH y el Nuevo San Juan Paranguaricutiro, en relación a experiencias relacionadas con Invertir en recursos comunes para el desarrollo inclusivo y sostenible, con productores e investigadores de la UMSNH e INIFAP, y se recorrió el Campo Forestal Experimental INIFAP.

Fue posible conocer enfoques para el manejo forestal sustentable en áreas comunales por parte de pequeños productores en temas relacionados con selección de material genético, propagación, establecimiento y aprovechamiento de los recursos forestales, principalmente de especies de *Pinus*.

**PROFESIONALES E INVESTIGADORES CONTACTADOS DURANTE LA GIRA TÉCNICA**

<b>Nombre</b>	<b>Institución</b>
Dra. Verónica Elizabeth Badillo Almaraz	ININ. Directora de Investigación Científica
Dra. Norma Alicia Hernández Beltrán	ININ. Gerente de Ciencias Básicas
Dr. Luis Robledo Arratia	ININ. Jefe del departamento de Biología
Biól. Josefina González Jiménez	ININ. Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales. Depto. Biología
M C. Juan Manuel García Andrade	ININ. Proyecto Fitomejoramiento. Depto. Biología
Ing. Roberto Raya Arredondo	ININ, Reactor Nuclear
Dr. Rogelio Flores Velázquez	INIFAP. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) DIRECTOR
Dr. Carlos Román Castillo Martínez	INIFAP. Responsable Laboratorio de Biotecnología CENID-COMEF
Dra. Florencia García Campuzano	INIFAP. Responsable Laboratorio de Biología Molecular Forestal
MC. Gaudencio Benítez Molina	PROBOSQUE- Titular de la Unidad de Conservación de Suelos Forestales
Ing. José Alfonso García Hernández	PROBOSQUE. Director de Restauración y Fomento Forestal
Ing. Iván Delfino Gómez Patiño	PROBOSQUE. Jefe de Departamento de Producción de Planta
Geog. Sergio Cuevas Solorzano	PROBOSQUE. Jefe de Departamento de Apoyo a las plantaciones Comerciales
C.P. Bernardo Iván Calderón Contreras	PROBOSQUE. Jefe de Departamento de Asistencia Técnica a la Producción Forestal
MC Armandina de la Cruz Olvera	PROBOSQUE. Jefa del Laboratorio de Biotecnología Forestal
Ing. Norberto Sánchez Martínez	TECSSAGRO. Tecnología Sustentable al servicio del Agro.
Dr. Carmen Ayala Sosa	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Profesor
M.C. David García Cíntora	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Director de Investigación
Ing. Héctor Daniel Camacho Gurrola	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Jefe del Vivero
Ing. Isaac Ramírez Barraza	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Estación experimental Zoquiapan
Dr. Hugo Ramírez Maldonado	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Investigador
Dr. Javier Santillán Pérez	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Subdirector de Investigación y Servicio
Dr. Enrique Serrano Gálvez	Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales DICIFO. Director
Ing. Jorge Espejel Morales	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Productor de árboles de navidad, ecoturismo y asesor del Ejido de Atlatlauhualquitepec, Puebla
Ing. Manuel Morales Martínez	Presidente de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan, Zacatlán, Puebla. Ejido Llano Verde, Chignahuapan, Puebla
Dr. Jesús Vargas Hernández	Colegio de Postgraduados
Dr. José Donaldo Ríos	Colegio de Postgraduados
Dr. Carlos Ramírez Herrera	Colegio de Postgraduados
Dr. Marcos Jiménez casas	Colegio de Postgraduados
Dr. Héctor de los Santos	Colegio de Postgraduados
Dr. Jesús García Magaña	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología
Dra. Patricia Delgado Valerio	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología
Dra. Martha Elena Pedraza Santos	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología. Experta en orquídeas
Ing. Fidel Carrillo Quiroz	Director de Delegaciones Regionales de SADER
M.C. Gregorio Anguiano Echevarría	Asesor Forestal, Ejido Nuevo San Juan Parangaricutiro. Michoacán
Ing. Francisco Sánchez Macías	Responsable de Vivero Forestal Comunal San Francisco Cherán.

	Michoacán.
M.C Gamaliel Valdivia	Tecnológico de Los Reyes, Michoacán. Investigador en zarzamora.
M.C Eréndira Rubio Ochoa	Estudiante de Doctorado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Estudio de Radiosensibilidad en Opuntia
Lic. Diego Ayala Durán	Jefe del Departamento de Vinculación. Tecnológico Superior Purhépecha. Cherán

El autor dispone de contactos telefónicos y de correo electrónico para todos estos profesionales e investigadores. A través de él ([parojas@infor.cl](mailto:parojas@infor.cl)) pueden ser contactados.



# CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL

