



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^{1*}; Felipe Navarrete Ulloa.¹; Karina Luengo Vergara¹ & Mauricio Navarrete Torres¹

¹ Instituto Forestal, sede Biobío, Chile. jpinilla@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 kg/m^3 , and in *Acacia mearnsii*, it was 2.67 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 (rodelas) 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/m³, 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/m³ y una densidad de la madera seca al aire de entre 550 y 800 kg/m³. 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/m³, según distintas procedencias descritas.

En cuanto a *Acacia dealbata*, Pinilla & Hernández (2010) reportaron densidades básicas de entre 320 y 540 kg/m³ 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/m³, 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/m³, y finalmente para un bosque de densidad 15.000 árboles/ha y 4 vástagos promedio por tocón, la densidad básica fue de 380 kg/m³, 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 rodelas 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
Total <i>A. dealbata</i>			91
<i>Acacia mearnsii</i>	Plantado	Florida, Biobío	272
<i>Acacia mearnsii</i>	Plantado	Los Sauces, Biobío	32
Total <i>A. mearnsii</i>			304

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 g/cm^3 , el peso del agua desplazada al depositar la rodela, equivale al volumen de la rodela en 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 (cm³)

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⁻¹), 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/m³)

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**).

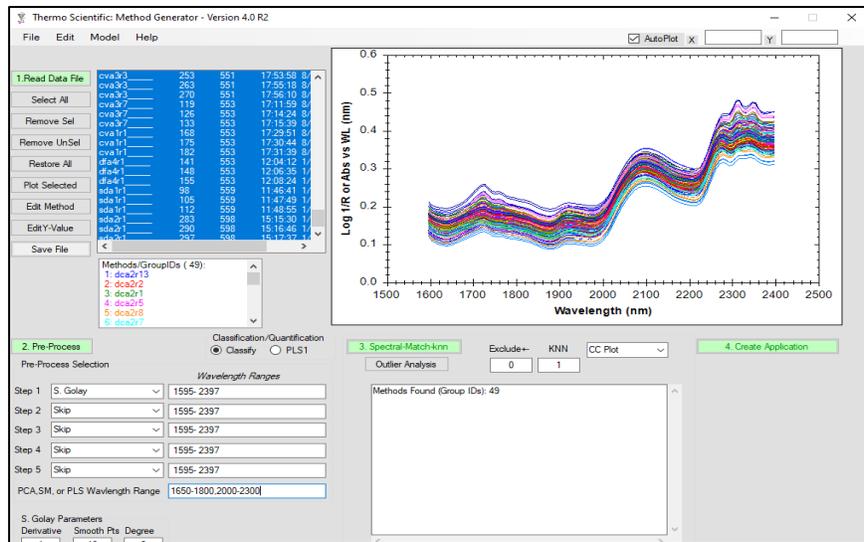


Figura 6. Espectros seleccionados en set de calibración de *Acacia dealbata*

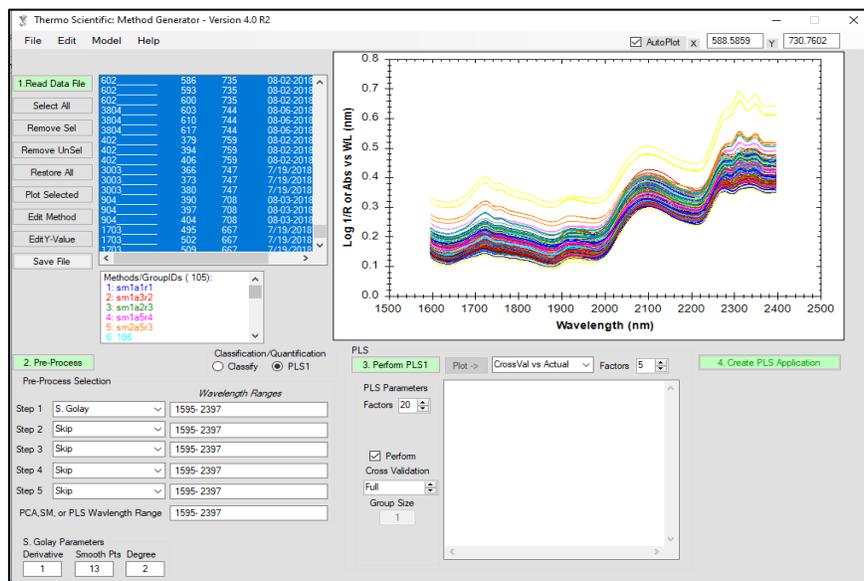


Figura 7. Espectros seleccionados en set de calibración de *Acacia mearnsii*

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).

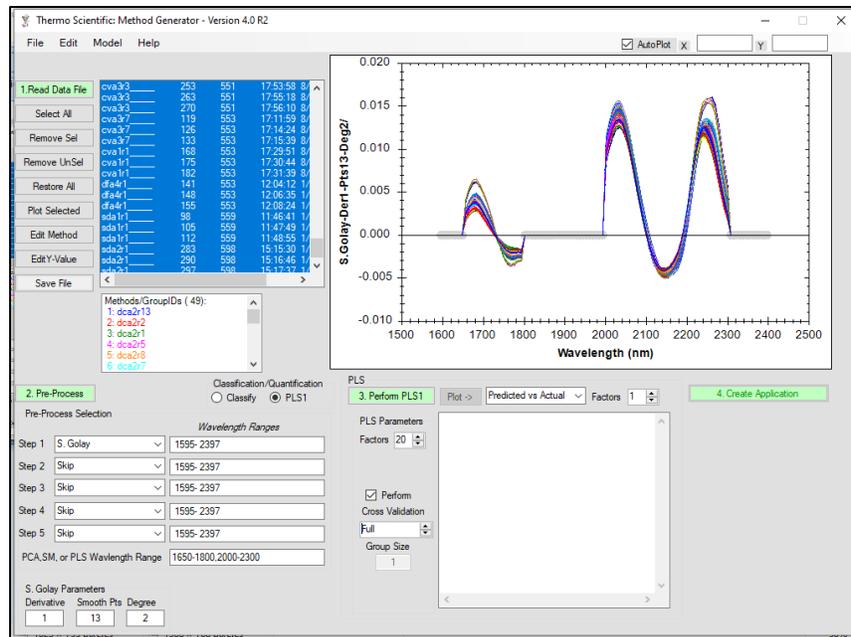


Figura 8. Tratamiento y suavizado de espectros de *Acacia dealbata*

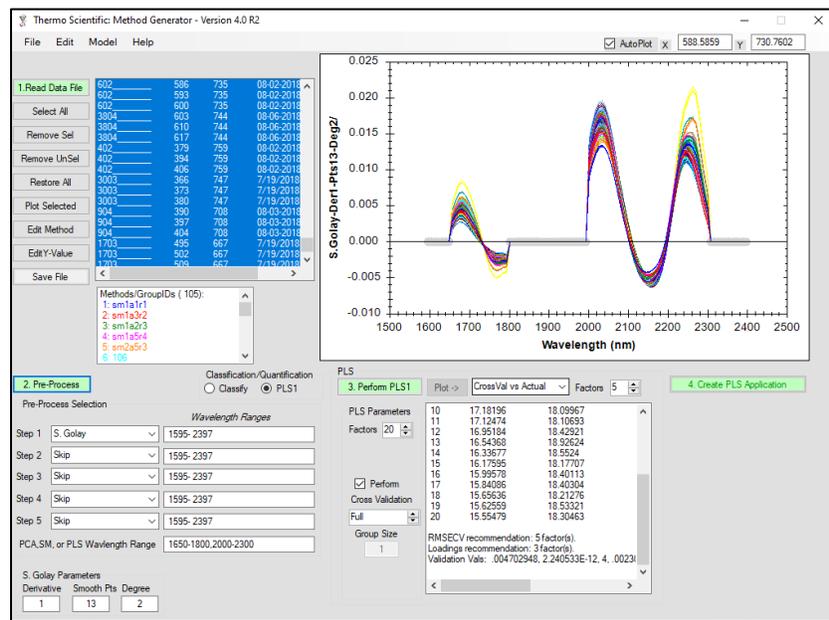


Figura 9. Tratamiento y suavizado de espectros de *Acacia mearnsii*

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/m³. 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/m³ (Figura 12).

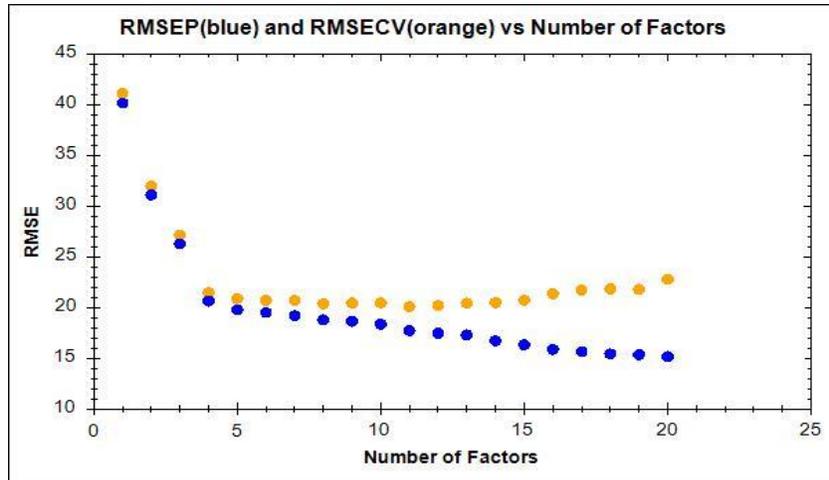


Figura 10. RMSE vs componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia dealbata*. (RMSECV:raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada. RMSEP: raíz cuadrática media del error estándar de predicción)

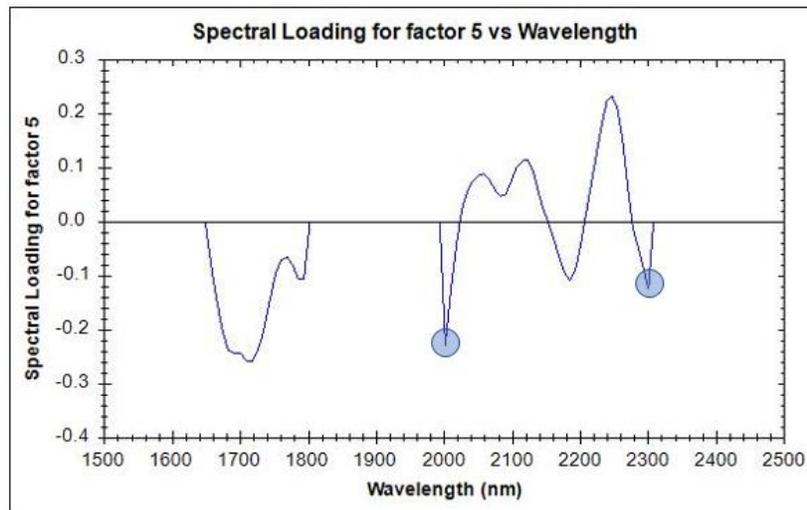


Figura 11. Gráfico loading con 5 componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia dealbata*

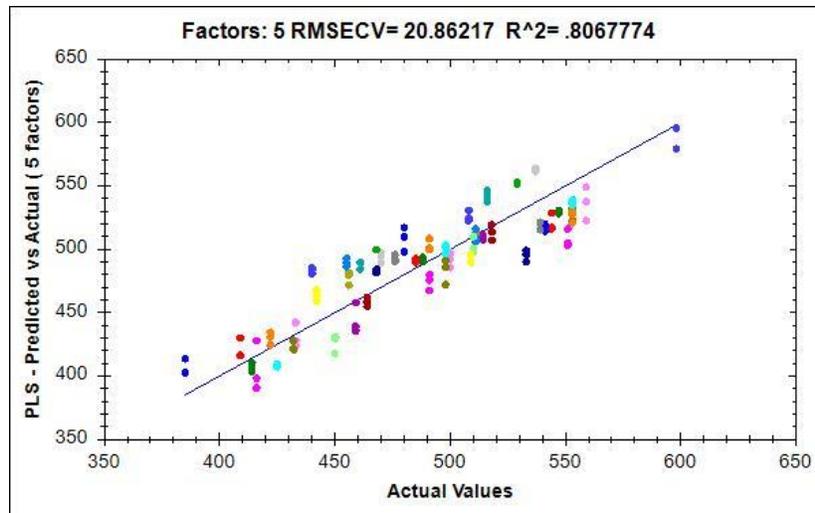


Figura 12. Modelo de calibración de densidad básica para *Acacia dealbata*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

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/m³, 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/m³ (**Figura 15**).

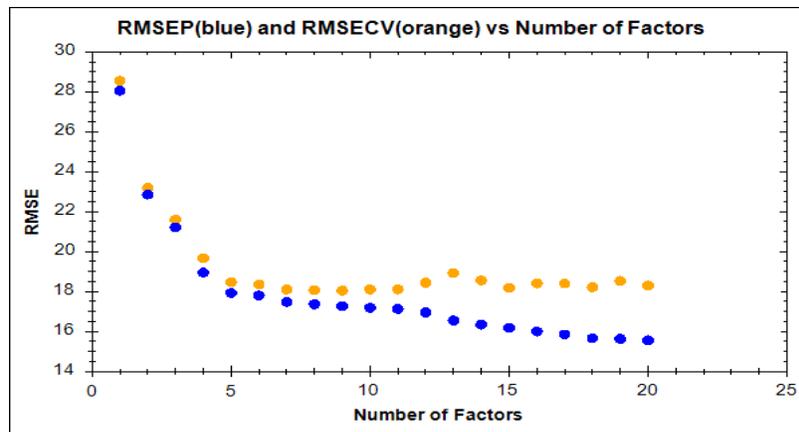


Figura 13. RMSE vs componentes regresión multivariables de mínimos cuadrados parciales, PLS, *Acacia mearnsii*. (RMSECV:raíz cuadrática media del error estándar de calibración cruzada. RMSEP: raíz cuadrática media del error estándar de predicción)

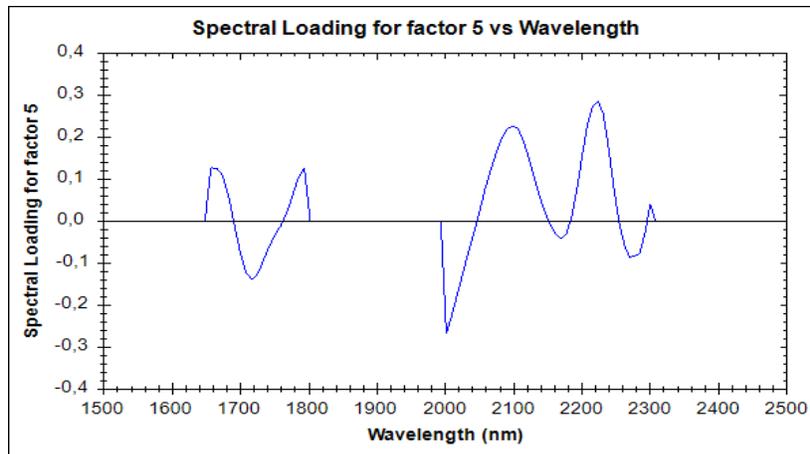


Figura 14. Gráfico loading con 5 componentes PLS, *Acacia mearnsii*

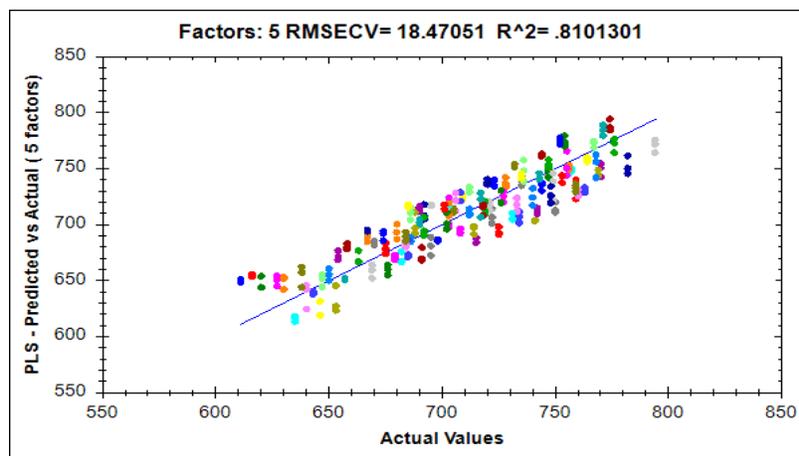


Figura 15. Modelo de calibración de densidad básica para *Acacia mearnsii*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

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/m³ (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/m³ (Cuadro 4). La media del error asociado a este modelo predictivo es de -5,46 kg/m³.

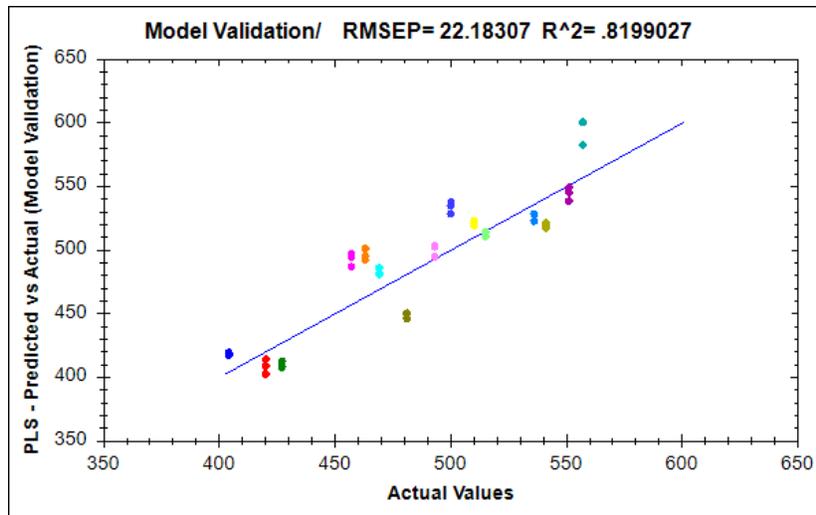


Figura 16. Modelo de validación de densidad básica para *Acacia dealbata*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

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

Parámetro	Valor
RMSE	22,18
Error Promedio	-5,45
R ²	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/m³ (**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/m³ (**Cuadro 5**). La media del error asociado a este modelo predictivo es de 2,67 kg/m³.

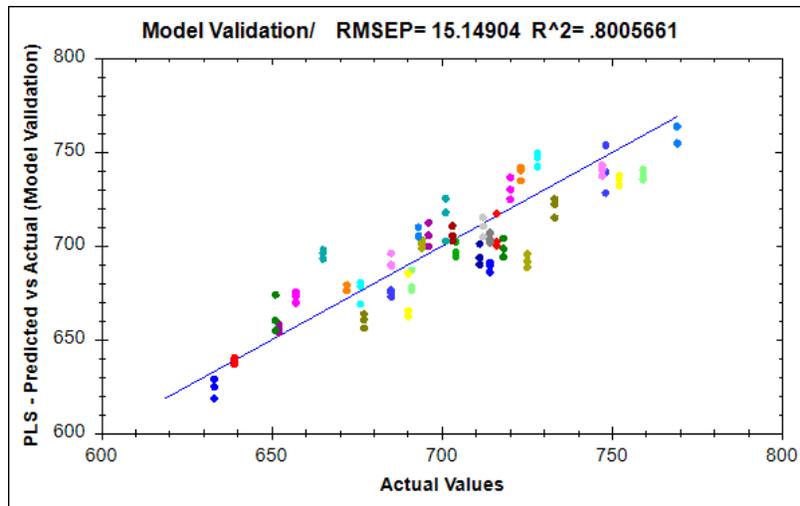


Figura 17. Modelo de validación de densidad básica para *Acacia mearnsii*. Eje x: valores reales (Tappi). Eje Y: valores estimados (NIR).

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

Parámetro	Valor
RMSE	15,15
Error Promedio	2,67
R ²	0,80
Pendiente	0,84
Coefficiente 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 ³)		Error Mínimo (kg/m ³)	Error Máximo (kg/m ³)	Media del error (kg/m ³)	Raíz cuadrática media del error estándar (Kg/m ³)
	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/m³, con una raíz media del error de 22,18 Kg/m³. 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/m³ y 43,77 kg/m³, 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/m³, con una raíz media del error de 15,15 kg/m³. 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/m³ y 36,37 kg/m³, 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.