



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

Uso de la espectroscopia NIR en la evaluación no destructiva de la densidad básica y la estabilidad dimensional de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh



Damián Pablo González

TESIS DOCTORAL

Facultad de Ciencias Forestales

Santiago del Estero, Argentina

2019





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



Uso de la espectroscopia NIR en la evaluación no destructiva de la densidad básica y la estabilidad dimensional de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh

TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS FORESTALES

POR

Damián Pablo González

Ingeniero Forestal – UNSE – 2008

Director de tesis: **Dra. Juana Graciela Moglia**
Co-Director: **Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein**

Santiago del Estero, Argentina.
Año 2019

ISBN 978-987-1676-90-3



González, Damián Pablo

Uso de la espectroscopia NIR en la evaluación no destructiva de la densidad básica y la estabilidad dimensional de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh: tesis doctoral FCF UNSE / Damián Pablo González; dirigido por Juana Graciela Moglia; Paulo Ricardo Gherardi Hein. - 1a ed. - Santiago del Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE. Facultad de Ciencias Forestales, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-1676-90-3

1. Propiedades de la Madera. 2. Especies Forestales. 3. Eucaliptos. I. Moglia, Juana Graciela, dir. II. Gherardi Hein, Paulo Ricardo, dir. III. Título.

CDD 620.12



FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES
DIRECCIÓN DE POSGRADO



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

TERMINO DE APROBACIÓN

TESIS DOCTORAL

El Tribunal designado por la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), mediante Resolución FCF N° 158/19, para examinar la Tesis del doctorando Damián González, titulada: **“Uso de la espectroscopía NIR en la evaluación no destructiva de la densidad básica y la estabilidad dimensional de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh”**, está constituido por: Dra. Graciela Inés Bolzon (Universidad Federal de Paraná, UFPR), el Dr. Iván Venson (Universidad Federal de Paraná, UFPR), y la Dra. Ana María Giménez (Universidad Nacional de Santiago del Estero, UNSE).

Después de evaluar la Tesis e interrogar al doctorando, el Jurado deliberó por la Aprobación con la calificación 9 (nueve).


Firma
Dra. Graciela Inés Bolzón


Firma
Dra. Ana María Giménez


Firma
Dr. Ivan Venson

Santiago Del Estero, 30 de agosto de 2019



Esta tesis está dedicada a las personas que marcaron el camino en mi vida, ellas son:

Mi esposa Alexia y mi hijo Nicolás razón de vida, por el apoyo incondicional y por tanto amor.

Y a mis padres Oscar y Ana que me enseñaron los valores más importantes (respeto, honestidad y amor en lo que uno hace) y por la confianza que siempre tuvieron en mí.

“La ciencia se compone de errores, que a su vez son los pasos hacia la verdad”.

Jules Verne

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue elaborada gracias a la participación y el apoyo de instituciones y numerosas personas a las cuales siempre estaré agradecido. En primer lugar se encuentran las Instituciones que hicieron posible la concreción de este anhelo, ellas son:

- La AGENCIA NACIONAL DE PROMOCION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA (ANPCyT) por darme la posibilidad de realizar mi doctorado mediante la beca otorgada.
- A la FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO, por permitir el uso de distintos laboratorios e instalaciones, así como el apoyo Institucional a lo largo de todos estos años.

Mientras que, en referencia a las personas que me acompañaron en este largo camino va mi profundo agradecimiento:

- A mi esposa Alexia, mi compañera de la vida, por apoyarme en los momentos difíciles y por ser siempre tan paciente y motivadora.
- A mi Directora de tesis Dra. Juana Moglia (Viecky), por darme la posibilidad de conocer este maravilloso camino que es la investigación, por su apoyo, confianza, dedicación y predisposición durante toda esta etapa de trabajo.
- Al grupo de INTA Bella Vista, Juan y Javier López, José Ruiz Díaz, Juan Sánchez y Cristian Almirón, por su gran colaboración y por permitir el uso de equipos e instrumentos que no estaban a nuestro alcance en la etapa de muestreo de esta tesis.
- A la Dra. Graciela Bolzon y Silvana Nisgoski, docentes e investigadoras de la Facultad en Ingeniería Forestal de la Universidad Federal de Paraná, por el asesoramiento en el uso del Equipo NIR y por confiar y permitir su utilización durante mi estancia en Curitiba, Brasil.

- Al Dr. Paulo Hein por ayudarme con su experiencia en los análisis estadísticos referidos a la técnica NIRS y por su valorada ayuda, incondicional predisposición y por el atento y cordial recibimiento en mi visita a la Universidad Federal de Labras, Brasil.
- A Marcia Acosta, a la Dra. Cecilia Bruno por el asesoramiento durante los análisis estadísticos y en particular a Marta Pece, siempre dispuesta en colaborar frente a cualquier inquietud.

Al Dr. Guido Lorenz por permitir usar el laboratorio de física de suelo donde estaba el equipamiento indispensable para la determinación de las propiedades físicas de las muestras analizadas.

- A mis colegas, compañeros y amigos del Laboratorio de Anatomía de la Madera por tantos años compartidos, por el espacio, ambiente de trabajo y de armonía indispensable para la elaboración de esta tesis.
- Al personal de carpintería del ITM y a los de tarea de campo del INSIMA por su desinteresada colaboración en el arduo trabajo de la etapa de muestreo
- A Fabián Zubrinic, por su ayuda, dedicación y tiempo invertido en la compaginación y los ajustes finales de esta tesis.

INDICE GENERAL

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Hipótesis.....	3
1.2	Objetivos	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	El género <i>Eucalyptus</i>	5
2.1.1	Introducción del género en Sudamérica	6
2.1.2	<i>Eucalyptus Camaldulensis</i>	6
2.2	Calidad de madera.....	8
2.3	Propiedades físicas de la madera.....	9
2.3.1	Definición de densidad	10
2.3.1.1	Formas de Expresión.....	11
2.3.1.2	Importancia de la densidad básica.....	12
2.3.1.3	Variabilidad de la densidad básica.....	12
2.3.2	Estabilidad dimensional	15
2.3.2.1	Origen de la contracción e hinchamiento	16
2.3.2.2	Variabilidad de la contracción e hinchamiento	16
2.3.2.3	Coefficiente de anisotropía	18
2.4	Ensayos no destructivos.....	18
2.5	Espectroscopia de infrarrojo cercano.....	20
2.5.1	Aspectos Básicos de la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano	22
2.5.2	Historia de la radiación infrarroja	25
2.5.3	Espectro electromagnético	26

2.5.4	Región espectral infrarroja.....	27
2.5.5	Tipos de análisis NIRS	27
2.5.6	Registro de la Radiación.....	28
2.5.7	Metodología de trabajo de la técnica NIRS para análisis cuantitativos - Etapas del proceso de modelado	30
2.5.8	Construcción del modelo NIR	33
2.5.8.1	Quimiometría.....	33
2.5.8.2	Técnicas multivariantes utilizadas para reducción de variables	34
2.5.8.2.1	Análisis en componentes principales	35
2.5.8.2.2	Regresión por mínimos cuadrados parciales	36
2.5.8.2.2.1	Ventajas y desventajas del método	38
2.5.9	Muestras anómalas (outliers).....	38
2.5.10	Validación de modelos.....	40
2.5.11	Estadísticos usados en la selección de modelos	41
2.5.12	Principales ventajas y desventajas de la técnica NIRS	43
3	MATERIAL Y MÉTODOS	45
3.1	Origen y muestreo del material de estudio.....	45
3.2	Elaboración de las probetas de ensayo	50
3.3	Determinación de densidad básica	52
3.4	Determinación de la contracción e hinchamiento.....	54
3.5	Adquisición de espectros NIR.....	56
3.5.1	Colecta de espectros en las muestras	57
3.5.2	Construcción de los modelos de calibración	57
3.5.3	Evaluación de propiedades por medio de NIRS.....	58
3.6	Análisis de los datos	58

4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1	Análisis de las propiedades físicas	60
4.1.1	Análisis y resultados de la densidad básica de la madera	60
4.1.1.1	Análisis de la variación de densidad básica según orientación	64
4.1.1.2	Análisis de la variación de la densidad básica según posición médula - corteza	66
4.1.2	Análisis y resultados de las contracciones de la madera	67
4.1.2.1	Análisis de la variación de las contracciones según orientación	75
4.1.2.2	Análisis de la variación de las contracciones según posición médula - corteza	76
4.1.3.	Análisis y resultados de la anisotropía de la contracción	78
4.1.3.1	Análisis de la variación del factor anisotrópico según orientación.....	80
4.1.3.2	Análisis de la variación del factor anisotrópico según posición médula - corteza	81
4.1.4	Análisis y resultados de los hinchamientos de la madera	82
4.1.4.1	Análisis de la variación de los hinchamientos según orientación	88
4.1.4.2	Análisis de la variación de los hinchamientos según posición médula - corteza	89
4.1.5	Análisis y resultados de las correlaciones entre la densidad básica y las contracciones lineales máximas y volumétrica	91
4.2	Análisis y resultados de los espectros NIR	93

4.2.1	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de las propiedades físicas de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh..	93
4.2.1.1	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la densidad básica	94
4.2.1.2	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la contracción en la cara tangencial.....	98
4.2.1.3	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la contracción en la cara radial.....	99
4.2.1.4	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción del hinchamiento en la cara tangencial.....	102
4.2.1.5	Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción del hinchamiento en cara radial.....	103
5	CONCLUSIONES.....	106
6	BIBLIOGRAFIA.....	108
7	ANEXOS	127

INDICE DE FIGURAS

Figuras		Página
1	Distribución geográfica de <i>E. camaldulensis</i> en el continente Australiano	7
2	Modo de vibraciones de los átomos.....	23
3	Forma del espectro de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	23
4	Espectros de absorción de infrarrojo cercano en madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> y las regiones de sobreposición y combinación de bandas de absorción	24
5	Espectro electromagnético	27
6	Esquema de incidencia de la luz sobre una superficie.....	28
7	Esquema de los modos de registro de los espectómetros NIR	29
8	Esquema de las etapas en la técnica NIRS	30
9	Gráfico de residuos vs leverage que indican los outliers del modelo	39
10. A	Esquema del diseño de Ensayo de Progenie y distribución de procedencias y familias en bloque I y II	48
10. B	Esquema del diseño de ensayo de progenie y distribución de procedencias y familias en bloque III y IV	49
11	Localización del ensayo genético de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	47
12	A- Abatimiento y trozado de árboles seleccionados para aserrado. B- Estibaje de las trozas con extremos pintados para evitar rápida desecación	50
13	Esquema de extracción de muestras para determinación de propiedades .	50
14	A- Transformación de trozas en tablones centrales de dirección Norte-Sur. B- Elaboración de listones para obtención de probetas en diferentes posiciones radiales	51
15	Selección y acondicionamiento de probetas	52
16	Obtención de peso seco mediante secado de muestras en estufa	53
17	Peso de muestras con utilización de desecador para evitar absorción de humedad.....	53

18	Determinación de volumen verde de las muestras.....	54
19	Medición de longitudes en dirección tangencial, radial y longitudinal en estado saturado.	55
20	Colecta de espectros con espectrofotómetro Bruker – Tensor 37	56
21	Toma de espectro en las probetas.....	57
22	Variación de la densidad básica según posición radial médula - corteza	62
23	Densidad básica promedio según posición radial médula-corteza en procedencias con diferente comportamiento.....	63
24	Gráfico de cajas para la densidad básica según posición radial médula - corteza y orientación cardinal.....	65
25	Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para la densidad básica según posición radial médula - corteza.....	66
26	Variación de las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula - corteza.....	70
27	Contracciones lineales máximas y total según posición radial médula - corteza en procedencias con diferente comportamiento	73
28	Gráfico de cajas para las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula - corteza y orientación cardinal	76
29	Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula - corteza	77
30	Variación del coeficiente anisotrópico según posición radial médula - corteza.....	80
31	Gráfico de cajas para el factor anisotrópico según posición radial médula - corteza y orientación cardinal.....	81
32	Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para el factor anisotrópico según posición radial médula - corteza.....	82
33	Variación del hinchamiento tangencial, radial y volumétrico según posición radial médula - corteza	84
34	Hinchamientos lineales máximos y total según posición radial médula - corteza en procedencias con diferente comportamiento	87
35	Gráfico de cajas para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula - corteza y orientación cardinal	89

36	Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula - corteza	90
37	Gráfico de correlación de la densidad básica en función de la contracción tangencial	92
38	Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para la densidad Básica.....	97
39	Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para la contracción en cara tangencial	102
40	Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para el hinchamiento en cara tangencial	105

INDICE DE TABLAS

Tablas		Página
1	Detalle del Material Genético.....	46
2	Estadísticos descriptivos para la densidad básica según posición radial al tronco.....	60
3	Estadísticos descriptivos para la densidad básica de la madera en función de sus procedencias.....	62
4	Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para la densidad básica.....	64
5	Estadísticos descriptivos para contracciones lineales máximas, volumétrica y factor anisotrópico según posición radial médula - corteza ...	68
6	Estadísticos descriptivos para la contracción radial de la madera en función de sus procedencias.....	71
7	Estadísticos descriptivos para la contracción tangencial de la madera en función de sus procedencias.....	71
8	Estadísticos descriptivos para la contracción volumétrica de la madera en función de sus procedencias.....	72
9	Clasificación de la contracción (β_{max}) al disminuir la humedad de la madera del estado verde a 0%.....	73
10	Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para la contracción de la madera.....	75
11	Criterio para calificar la estabilidad dimensional de la madera en función del coeficiente de anisotropía	79
12	Clasificación de la estabilidad dimensional de la madera en función del coeficiente de anisotropía basada en Durlo y Marchiori (1992).....	79
13	Estadísticos descriptivos para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula - corteza.....	83
14	Estadísticos descriptivos para el hinchamiento radial de la madera en función de sus procedencias.....	85
15	Estadísticos descriptivos para el hinchamiento tangencial de la madera en función de sus procedencias.....	86

16	Estadísticos descriptivos para el hinchamiento volumétrico de la madera en función de sus procedencias.....	86
17	Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para el hinchamiento de la madera.....	88
18	Coeficiente de correlación de Pearson para las propiedades físicas de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	91
19	Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos para la densidad básica de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	94
20	Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara tangencial para la contracción de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	98
21	Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara radial para la contracción de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	99
22	Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara tangencial para el hinchamiento de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	103
23	Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara radial para el hinchamiento de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	104

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos en la densidad básica de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	127
2	Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para las contracciones de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	128
3	Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para el factor anisotrópico de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	131
4	Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para el hinchamiento de la madera de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	132

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

A.I.T.I.M	Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera.
CV	Coeficiente de Variación
DAP	Diámetro a la altura de pecho.
DB	Densidad Básica
END	Ensayos no destructivos.
FIR	Infrarrojo lejano.
IR	Infrarrojo.
IRAM	Instituto de Racionalización Argentino de Materiales.
ISO	Organización Internacional de Estandarización (International Organization for Standardization).
ITM	Instituto de Tecnología de la Madera.
m s. n. m.	Metros sobre nivel del mar.
M.E	Masa específica.
MIR	Infrarrojo medio.
MSC	Corrección del efecto multiplicativo de dispersión (Multiplicative Scattering Correction).
NDT	Nondestructive testing.
NIR	Infrarrojo cercano.
NIRS	Espectroscopía de infrarrojo cercano.
NOA	Noroeste Argentino.
OSC	Corrección ortogonal de la señal (Orthogonal Signal Correction).
P.E	Peso específico.
PCA	Análisis de componentes principales (Principal Component Analysis).
PLS	Mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares).
PSF	Punto de saturación de fibras.

R^2	Coeficiente de determinación.
RMSECV	Error medio cuadrático de validación cruzada
RMSEP	Error medio cuadrático de predicción.
RPD	Relación del desempeño del desvío.
Sd	Desviación estándar
SEC	Error estándar de calibración.
SECV	Error estándar de validación cruzada.
SED	Error estándar.
SEP	Error estándar de predicción.
SNV	Variable normal estándar (Standard Normal Variate).
UNSE	Universidad Nacional de Santiago del Estero.
VL	Variables latent (Latent variables).
α Rd.	Hinchamiento radial
α Tg.	Hinchamiento volumétrico
α Vol.	Hinchamiento tangencial
β Rd.	Contracción radial
β Tg..	Contracción tangencial
β Vol.	Contracción volumétrica

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a saber y entender, original producto de mi propio trabajo, y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución”.

Damián Pablo González

Uso de la espectroscopia NIR en la evaluación no destructiva de la densidad básica y la estabilidad dimensional de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh

RESUMEN

La extracción selectiva y excesiva de especies forestales nativas de alto valor ha llevado a la degradación del recurso forestal en gran parte de la Región Chaqueña perjudicando el abastecimiento a las industrias madereras del NOA. La incorporación de especies con crecimiento rápido y de buena aptitud maderera permitirá diversificar la oferta de madera y disminuir la presión sobre el bosque nativo. Para evaluar ese comportamiento tecnológico es necesario implementar técnicas que caractericen la madera en forma rápida y no destructiva. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad predictiva de las propiedades físicas más influyentes en la calidad de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* mediante la utilización de la técnica de NIRS (Espectroscopia en infrarrojo cercano). Se utilizaron 29 individuos seleccionados de un ensayo de progenies en Santiago del Estero, Argentina. La densidad básica, contracción e hinchamiento se determinaron de acuerdo a las normas IRAM e ISO. La adquisición espectral se realizó en el modo absorbancia en la región entre los 9.000 a 4.000 cm^{-1} con resolución espectral de 2 cm^{-1} . La técnica NIRS se mostró adecuada para estimar las propiedades estudiadas. Los resultados permiten concluir que los mejores modelos se generan a partir de espectros tratados mediante primera derivada y a partir de validación independiente tanto en la densidad como en la contracción de la madera, siendo esta última propiedad obtenida a partir de caras tangenciales. Para el hinchamiento se consiguió con espectros adquiridos en caras tangenciales y tratados con derivada, eliminación de outliers y selección de longitudes de onda. Se determinó que los materiales con mejor desempeño para uso sólido fueron los de procedencias **A, LL, e I** en cuanto a calidad de madera.

Palabras claves: *Eucalyptus camaldulensis*, calidad de madera, espectroscopia en infrarrojo cercano.

Use of NIR spectroscopy in the non-destructive evaluation of the basic density and dimensional stability of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh wood.

ABSTRACT

The selective and excessive extraction of high value native forest species has led to the degradation of the forest resource in a large part of the Chaco Region, damaging the supply to the NOA's wood industries. The incorporation of species with rapid growth and good wood fitness will allow to diversify the wood supply and reduce pressure on native forest. To evaluate this technological behavior, is necessary to implement techniques that characterize wood quickly and non-destructively. The objective of this research was to evaluate the predictive capacity of the most influential physical properties in the quality of *Eucalyptus camaldulensis* wood by using the NIRS (Near Infrared Spectroscopy) technique. Twenty-nine selected individuals were used from a progeny trial in Santiago del Estero, Argentina. The basic density, shrinkage and swelling were determined according to the IRAM and ISO standards. The spectral acquisition was performed in the absorbance mode in the region between 9,000 to 4,000 cm^{-1} with spectral resolution of 2 cm^{-1} . The NIRS technique was adequate to estimate the properties studied. The results allow us to conclude that the best models are generated from spectra treated by first derivative and from independent validation both in the density and in the contraction of the wood, the latter being obtained from tangential faces. For swelling the model was achieved with spectra acquired on tangential faces and treated with derivative, elimination of outliers and selection of wavelengths. It was determined that the materials with the best performance for solid use were those of provenance **A**, **LL**, and **I** in terms of wood quality.

Keywords: *Eucalyptus camaldulensis*, wood quality, near infrared spectroscopy

1. INTRODUCCION

La madera que abastece a los aserraderos de la región del NOA proviene en su gran mayoría de especies nativas de alto valor comercial. La extracción selectiva, excesiva y sin criterio técnico de estas especies, ha llevado a la degradación del recurso forestal en gran parte de la Región Chaqueña.

A pesar de implementarse en el año 2007 medidas a nivel nacional para proteger y conservar los bosques naturales (Ley 26331 - Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos), la demanda de materia prima continúa en aumento y la oferta de madera es aún más limitada.

La incorporación de especies de rápido crecimiento puede ser una alternativa interesante para diversificar la producción forestal en la región y así descomprimir la situación por la que atraviesan nuestros bosques.

Entre las especies que reúnen estos requisitos el *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh es considerado un material valioso por su facilidad para propagarse, buen crecimiento, adaptabilidad y tolerancia a las condiciones edafo-climáticas de la región.

Sin embargo, la utilización de esta especie depende del adecuado conocimiento sobre su comportamiento productivo y tecnológico, la disponibilidad de semilla mejorada, y de las acciones de promoción que se lleven adelante por parte de los organismos provinciales.

En Santiago del Estero se estableció un ensayo de familias de progenies de polinización abierta procedentes de Australia y Sudáfrica de *Eucalyptus camaldulensis*.

Algunas de estas procedencias mostraron buenos valores de crecimiento y forma, pero el conocimiento de su potencial tecnológico va a estar determinado en función de parámetros de calidad de su madera.

Hasta hace poco tiempo la selección de genotipos se basaba en valores fenotípicos de crecimiento, específicamente en productividad volumétrica. La tendencia actual busca además materia prima con buenas aptitudes, para ello es necesario conocer cuáles y cómo deben ser las características necesarias para lograr la calidad requerida de acuerdo al uso final de la madera.

Para ello es necesario incorporar en los objetivos de los programas de mejoramiento forestal además de rasgos de crecimiento y forma, atributos que permitan maximizar la obtención de productos sólidos de buenas aptitudes tecnológicas.

Son numerosas las características que establecen la calidad de una madera, las mismas dependen del uso que se le asigne al producto a obtener. En esta investigación se hará referencia específicamente a la densidad básica y a la contracción e hinchamiento, propiedades físicas de gran relevancia al momento de evaluar una madera para uso sólido.

En Argentina los programas de mejoramiento genético de eucaliptos y pinos, incorporaron recientemente características de interés tecnológico como criterio de selección. Así por ejemplo, la empresa foresto-industrial Pomera, inició a partir de 2001 su ciclo de segunda generación con la obtención de clones de eucaliptos con mejoras de características relacionadas a la calidad de madera.

En la mayoría de los casos los métodos utilizados para la evaluación de las propiedades tecnológicas se realizan a través de ensayos destructivos normalizados, lo que ocasiona pérdida de tiempo, de material y elevado costo de muestreo.

Estos inconvenientes no son apropiados en programas de mejoramiento ya que además de la destrucción de los árboles evaluados conducen a una caracterización reducida de los materiales genéticos. Por lo tanto la utilización de métodos no destructivos, posibilita una evaluación rápida de gran cantidad de árboles y permite una selección más intensa de individuos deseables.

Entre las alternativas nuevas, rápidas y confiables para la caracterización de la madera en forma no destructiva, se destaca la espectroscopia por infrarrojo cercana. Esta técnica es usada en estas últimas décadas en países como Brasil y Chile para estimar

diversas propiedades de la madera con buenos resultados, sin embargo en Argentina su utilización dentro del sector forestal es aún incipiente.

A fin de contribuir a mejorar la selección de individuos en programas de mejoramiento genético y de ampliar el conocimiento y la utilización de la técnica NIRS, en esta investigación se propone:

1.1 Hipótesis

La técnica NIRS permite estimar las propiedades físicas: densidad básica, contracción e hinchamiento de los individuos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y puede utilizarse como una herramienta práctica para la evaluación en pie de árboles en ensayos genéticos forestales.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar la capacidad predictiva de la técnica de NIRS en la determinación de las propiedades físicas de densidad básica, contracción e hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Objetivos Específicos

Caracterizar a través de la densidad básica, contracción e hinchamiento y coeficiente de anisotropía la madera de diferentes materiales genéticos de la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Evaluar la variabilidad de las propiedades seleccionadas según orientación (Norte – Sur) y distancia a la médula.

Evaluar las correlaciones entre densidad básica y contracción e hinchamiento.

Desarrollar modelos quimiométricos para la predicción de la densidad básica y contracción e hinchamiento en la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 El género *Eucalyptus*

La palabra eucalypto deriva del griego eu, que significa bien, y kalypteim, que es cubierto y se refiere a los pétalos connados de la flor que forma un opérculo o capucha protectora que se desprende a la madurez (Sánchez y Ríos 2007).

El género pertenece a la familia Myrtaceae y es originario de Australia, donde cubre aproximadamente el 90 % de la superficie de ese país. Se destacan por la alta variabilidad genética, incluyendo más de 700 nombres de especies, variedades e híbridos (Assís, 1996). Este gran número de especies proporciona una variedad de maderas que van desde blandas y blancas a rojizas y duras, con una importante variación en sus aptitudes tecnológicas, lo que permite su empleo en diversos usos (Assís, 1999).

Para Eldridge *et al.* (1993) citado por Viana (2008) las especies del género *Eucalyptus* más plantadas en el mundo son *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna*, *E. deglupta*, *E. enxerta* y *E. citriodora*.

2.1.1 Introducción del género en Sudamérica

De acuerdo a Acosta y Sepliarsky (2005) la introducción de especies de eucaliptos en Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay y Chile comenzó en el siglo pasado principalmente para cortinas y montes de reparo de la ganadería, recién avanzado el siglo XX comenzó su promoción y difusión. La década del 70' fue el punto de inflexión que determinó el incremento en el ritmo de plantación y lo llevó a nivel comercial.

El aumento de las forestaciones con Eucalipto de América del Sur obedece a diferentes causas. En Brasil el impulso en la forestación con eucalipto se produjo por la crisis energética que atravesaba el país, mientras que en Argentina se debió al fomento de plantaciones mediante desgravaciones impositivas. En Chile se cultivó para su empleo como puntales en las minas, principalmente de carbón y solo en los últimos 20 años adquirió importancia en cuanto a conversión mecánica y celulósica. En Uruguay el auge de la forestación es más reciente, primero con los eucaliptos colorados y en la década del 90' con eucaliptos más claros. En Paraguay el auge de las plantaciones es aún más reciente, también comienza con colorados y posteriormente con *E. grandis* (Luengo 1995).

2.1.2 *Eucalyptus camaldulensis*

Es la especie del género de más amplia distribución (Figura 1), su rango latitudinal va de los 12 ½ a los 38° S, encontrándose en casi toda la parte continental de Australia a excepción de partes del sur de Australia Occidental, sur-oeste de Australia del Sur y las zonas costeras del este de Queensland, Nueva Gales del Sur y Victoria (Chippendale 1988). Esta especie crece en climas templados con lluvias de invierno en la parte sur, a tropicales con lluvias de verano en la parte norte del continente australiano. Con precipitaciones de 200 mm a más de 1100 mm/año y con heladas frecuentes e intensas en el sur y ausentes en el norte. El rango de altitud va de los 20 a 700 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) (Boland *et al.*, 1984; Eldridge *et al.*, 1993) y fuera de Australia quizás constituye la principal especie de eucalipto plantada en zonas semiáridas o áridas (Eldridge, *et al.*, 1993).

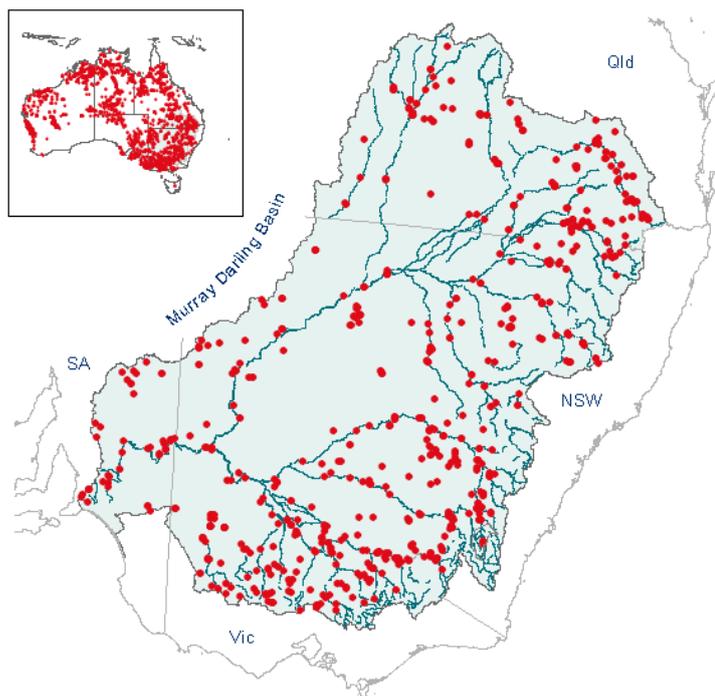


Figura 1. Distribución geográfica de *E. camaldulensis* en el continente Australiano

Fuente: <http://www.anbg.gov.au/cpbr/WfHC/Eucalyptus-camaldulensis/index.html>

En Argentina los eucaliptos colorados, principalmente el *E. camaldulensis*, sucedieron a la primer especie introducida (*E. globulus*), plantados inicialmente en la región bonaerense como montes de reparos y cortinas, o para aprovechar sitios bajos debido a su gran rusticidad. Debido a esa plasticidad y resistencia a frío, sequía, inundaciones y salinidad es que comenzó a difundirse a varias regiones del país, como Río Negro, Mendoza, Córdoba, Santa Fe, e incluso en NOA (López 2004; Acosta y Sepliarsky 2005).

Es un árbol de gran porte, puede alcanzar hasta unos 30 m de altura con diámetros de hasta 2 m. Presenta una corteza de aspecto liso y de color gris o marrón claro, que muestra un aspecto manchado ocasionado por las numerosas placas irregulares de ritidoma que se desprenden. Su copa es generalmente extendida con ramitas pendulares. La madera de esta especie es de color rojizo dura y pesada ($1,19 \text{ kg/dm}^3$ verde y $0,89$ seca al aire). La albura es fácilmente penetrable por líquidos preservantes, no así el duramen que es impenetrable (Mangieri y Dimitri 1961).

El grano es entrecruzado y a menudo ondulado. Es de textura fina y puede presentar diseños agradables. Es una madera durable en contacto con el suelo y es

resistente al ataque de termitas. Es dura y resistente en compresión axial pero debido a su grano entrecruzado no se la considera para vigas. No es difícil de aserrar y fuera de una tendencia de su grano a levantarse al lijado, se trabaja bien a máquina o con herramientas manuales y toma bien el lustre (Boas, 1947).

Actualmente la madera se la destina mayoritariamente a usos energéticos (leña, carbón, siderurgia), ya que su aptitud celulósica-papelera no es muy buena por su color y por los altos contenidos de extractivos y lignina que contiene su madera. Pero existen casos muy interesantes de usos como madera sólida, especialmente pisos de alto valor y muebles (Mendoza, Buenos Aires, Santa Fe y Misiones), para tableros de fibras de alta densidad y algunos laminados decorativos, lo que demuestra un verdadero potencial de esta especie (Marcó y Harrand 2005; Acosta y Sepiarsky 2005).

2.2 Calidad de la madera

La calidad de la madera es un concepto difícil de definir con precisión por ser una apreciación subjetiva, que cambia en función del uso que se pretenda asignar a la madera.

De forma general se la puede definir como una serie de atributos que hacen a la madera apropiada para un determinado empleo (Nisgoski 2005; Gonçalves 2006) o sea que puede presentar características deseables para ciertos usos, pero indeseables para otros. Por lo tanto la calidad de la madera impone una diferenciación por producto en que las características implicadas en cada uso final son diferentes.

Según Nisgoski (2005) en muchos casos no se utilizan parámetros relacionados a la calidad de madera en los programas de mejoramiento, debido a la dificultad de evaluar ciertas propiedades y al alto costo que eso significa. Cuando ella está incluida, la densidad de la madera es la variable que tradicionalmente se mide, por la facilidad de determinación, por su fuerte vínculo con la productividad, la calidad de los productos derivados de la madera y por representar una respuesta de las características anatómicas y químicas de las especies. Dorado *et al.* (1995) mencionan como parámetros importantes además de la densidad, la estabilidad dimensional, el área conductora de los poros y longitud de las fibras.

En la actualidad existe preocupación por la baja calidad de la madera producida, lo que lleva a tener problemas al momento de procesarla. Los ciclos de aprovechamiento cada vez más cortos, producen madera con alto porcentaje de leño juvenil. Esta característica se considera responsable de disminuir la calidad de la madera ya que influye en las propiedades y según Latorraca y Albuquerque (2000) la madera con mayor porcentaje de leño juvenil tiene una tendencia en proporcionar baja densidad y contracciones más acentuadas.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las consideraciones previas en esta investigación se analizan las propiedades físicas de densidad básica y estabilidad dimensional como parámetros de evaluación para valorar la potencialidad de esta especie como madera de calidad para uso sólido.

2.3 Propiedades físicas de la madera

La madera al ser un material biológico, heterogéneo y anisotrópico presenta características que deben ser conocidas y tenidas en cuenta para cualquier aplicación que se realice (Chies 2005).

Las propiedades físicas pueden definirse como aquellas que determinan el comportamiento de la madera frente a distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química en su estructura externa (Alfini 2013).

Tsoumis (1991) citado por Castro (2002); Rodrigues (2002); Santos (2010) y Baraúna *et al.* (2017) son algunos de los autores que afirman que las propiedades físicas, más estudiadas y relevantes para el uso de madera sólida son la densidad básica, la humedad y la estabilidad dimensional (contracción e hinchamiento) y si bien no son los únicos los parámetros que definen la calidad de una madera, dan una buena estimación de ella.

Existen numerosos trabajos (Souza *et al.*, 1986; Monteoliva *et al.*, 2002; Doldán 2003; Oliveira y Silva 2003; Oliveira *et al.*, 2010; Lopes *et al.*, 2011; Arantes *et al.*, 2016; Sette *et al.*, 2016) que demuestran que las propiedades físicas de la madera no solo varían entre especies y dentro de una misma especie, sino también dentro de un mismo árbol tanto en dirección longitudinal como en la radial. Estos estudios son de gran

importancia, ya que estas variaciones provocan dificultades para la industria de la transformación y de procesamiento mecánico. Cuanto más heterogéneas sean las propiedades de la madera procedente de un mismo tronco, más dificultades presentará su transformación industrial y en consecuencia, menor será su valor. Según Berger (2000) la uniformidad de la materia prima permite obtener productos con mejores características y mayor valor agregado.

Wangaard (1981) citado por Toro *et al.* (2009) afirma que el estudio y el conocimiento de la variabilidad de las propiedades físicas y tecnológicas en la madera son herramientas valiosas que ayudan a su mejor aprovechamiento y permiten dar a cada especie o grupo de especies, los usos más acordes con sus propiedades.

2.3.1 Definición de densidad

La densidad expresa la relación entre la masa de los distintos elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. La densidad es por lo tanto es una medida de la cantidad de material sólido presente en un volumen dado (Mantero 1999).

Pero al ser la madera un material poroso, según Spavento *et al.* (2008) se debe considerar una “densidad real” y una “densidad aparente” para la misma muestra de madera. La densidad real equivale a la densidad de la materia leñosa de la pared celular, cuando se descarta en la valoración del volumen todos los espacios huecos. Su valor es considerado constante para todas las especies, ya que depende de la densidad de sus componentes lignina, celulosa, hemicelulosas y extractivos que son los más densos. Mientras que la densidad aparente toma en consideración el volumen y la masa de la madera considerando los espacios porosos. Este es un valor variable, porque no solo depende de la estructura de la madera, sino también del contenido de humedad de la muestra, el cual influye sobre el peso y su volumen.

2.3.1.1 Formas de Expresión

Existen distintos tipos de densidad según la manera en que se mide esta propiedad, los resultados obtenidos son diferentes dependiendo de la cantidad de agua presente en la madera. Por tal motivo debe especificarse a que humedad se realizan las medidas de masa y volumen. En el manual de la construcción de viviendas de madera la norma Chilena Oficial NCh 176/2 Of 86 modificada en 1988, expresa en forma clara las diferentes maneras de nombrarlas.

- A. Densidad Anhidra: Relaciona la masa y el volumen de la madera anhidra (completamente seca).
- B. Densidad Normal: Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera con un contenido de humedad del 12 %.
- C. Densidad Básica: Relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con humedad igual o superior al 30 % (PSF).
- D. Densidad Nominal: Es la que relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con un contenido de humedad del 12 %.
- E. Densidad de Referencia: Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera ambos con igual contenido de humedad.

De todas las expresiones definidas Kollmann (1959) expresa que la densidad básica es el tipo de densidad que mejor permite establecer claramente criterios de comparación, debido a que las condiciones de masa anhidra y volumen verde o saturado resultan ser muy estables en la madera.

De acuerdo a Nuñez (2007) la razón de su uso en ámbitos forestales, se debe a que define la relación que hay entre material seco de madera y su volumen. Así con la medición del volumen de madera en una plantación o en un individuo en pie y el conocimiento de su densidad básica, se determina cuanta madera seca corresponde.

2.3.1.2 *Importancia de la densidad básica*

En la evaluación de la calidad de madera, la densidad se considera como uno de los parámetros que aporta mayor información sobre su comportamiento. Esto se debe a que las características tecnológicas y económicas más importantes están fuertemente correlacionadas con ella (Chimelo 1980; Delmastro *et al.*, 1980; Prado y Barros. 1989; Pereyra y Gelid 2002; Castello 2007; Sette *et al.*, 2016).

De acuerdo a Nuñez (2007) el empleo de esta propiedad se debe a su versatilidad, ya que es un buen indicador de calidad y su determinación es sencilla y económica. La densidad de la madera es una característica tecnológica importante que influye en la higroscopicidad y en los cambios dimensionales (Chies 2005; Castello 2007) en las propiedades mecánicas (Jozsa y Middleton 1994; Chies 2005; Castello 2007) como así también con las características relacionadas al procesamiento, grado de trabajabilidad y calidad de acabado de la madera (Jozsa y Middleton 1994; Fornés y Pan 2003; Chies 2005).

Según Castello (2007) la densidad de la madera es un criterio usado para estimar la calidad de la producción y rendimiento de pulpa para papel, la producción y calidad del carbón vegetal y los costos de operación asociados con el transporte y el almacenamiento de la madera.

Además es un carácter heredable y de alta variación entre especies y dentro de una misma especie (Ferreira 1970; Zobel y van Buijtenen 1989; Apiolaza *et al.*, 2011). Estos motivos hacen que sea la característica más estudiada en las especies forestales en general y en los géneros eucaliptos y pinos en particular, empleándose en programas de mejoramiento forestal por ser una propiedad viable a ser manipulada genéticamente (Missanjo and Matsumura 2016).

2.3.1.3 *Variabilidad de la densidad básica*

En 1981 Wangaard exponía que el estudio y el conocimiento de la variabilidad de las propiedades físicas y tecnológicas en la madera son herramientas valiosas que

ayudan a su mejor aprovechamiento y permiten dar a cada especie o grupo de especies los usos más acordes (Toro *et al.*, 2009).

La importancia del estudio de la variabilidad en la densidad de la madera se debe a que a mayor homogeneidad dentro del árbol, mejor es el comportamiento de las operaciones de procesamiento, lo que refleja una mayor uniformidad en otras propiedades tecnológicas (Oliveira *et al.*, 2005).

Numerosos autores afirman que la densidad en la madera varía de acuerdo a factores como la edad, la tasa de crecimiento de los árboles, el clima, los tratamientos silviculturales y el sitio. Así lo demuestra Ferreira (1972) al analizar la variabilidad de la densidad básica con respecto a la edad en *Eucalyptus grandis* de 11, 12, 13, 14 y 16 años. Brasil y Ferreira (1971) al registrar variaciones de la densidad básica en función del sitio y del espaciamiento de plantación en *Eucalyptus alba*, *saligna* y *grandis*. Similares observaciones fueron realizadas por Chies (2005) en *Pinus taeda* y Berger (2000) donde a su vez, determinó que estaba influenciada esta propiedad con la aplicación de fertilizantes. En *E. camaldulensis* a los 9 años de edad en el ensayo objeto de esta investigación Moglia *et al.* (2010) encontraron una correlación negativa aunque débil entre la densidad básica y el espesor de los anillos de crecimiento. El promedio de espesor de los anillos encontrado para ese estudio fue de 10,64 mm promedio (9,65-24,3).

Desde hace varias décadas se sabía de las variaciones de la densidad básica. Panshin y Zeeuw en el año 1964 ya señalaban que la densidad variaba de una especie a otra, dentro de una misma especie y en la dirección radial y axial del mismo árbol, y manifestaban que esta variación era básicamente debida a su composición anatómica (Gonçalves 2006). Luego esta misma afirmación fue corroborada por investigadores como Tomazello Filho (1985); Zobel y Van Buijtenen (1989); Prado y Barros (1989).

Junior y García (2004) en su trabajo mencionan que varios autores concuerdan en que las dimensiones de los elementos anatómicos (longitud, ancho, espesor de paredes y diámetro de lumen de fibras o traqueidas) así como sus componentes químicos (celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos) inciden en la variación de densidad de la madera. Los estudios de Oliveira y Silva (2003) mostraron que las variaciones de la densidad básica entre especies dependen de los cambios en las proporciones de los vasos y de los espesores de las paredes celulares de las fibras. El incremento de la densidad puede deberse al aumento del espesor de la pared celular de las fibras o de un aumento en la proporción relativa de las fibras en relación a la proporción de vasos. Por el contrario, un

aumento en la proporción de vasos con o sin una disminución en el espesor de la pared celular conduce a una reducción en la densidad.

En términos generales el patrón de variación de la densidad es de aumentar en posición radial de médula - corteza y en sentido longitudinal al aumentar la altura en el fuste del árbol. Entre los autores que verificaron esta tendencia para la densidad básica, se encuentran los trabajos de Ferreira (1972) en *E. grandis*; Igartúa *et al.* (2002) en *E. globulus*; O'Neill *et al.* (2004) en *E. grandis*, Gonçalves (2006) en un híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla x grandis*, Arantes *et al.* (2016) en similares híbridos y González *et al.* (2018) en *Pinus caribaea var. hondurensis*.

Oliveira *et al.* (2005) al estudiar 7 especies de eucaliptos observaron similares patrones a los descritos a excepción de la variación de la dirección longitudinal en el cual solo el *E. grandis* seguía esa tendencia, las demás especies de eucaliptos tendían a disminuir los valores de densidad básica con la altura.

Las variaciones en sentido axial resultan menos apreciables, por tal razón la variación radial dentro del árbol es mayormente estudiado, trabajos como los de Tomazello Filho (1985) en *E. grandis* y *saligna*; López y Staffieri (2003) en *E. grandis* y *E. dunnii*; Oliveira y Silva (2003) en *E. saligna*; Calvo *et al.* (2006) en la determinación de la densidad anhidra en *E. grandis*, Trevisan *et al.* (2008) en *E. grandis*; Igartúa *et al.* (2009) en *Acacia melanoxylon* y Toro *et al.* (2009) en *Carapa guianensis* Aublet, ratifican este patrón de variación.

Estudios más recientes y con muestreos más intensivos con respecto a la posición, observaron que tanto en la dirección longitudinal como radial primero se produce un descenso en el valor de la densidad básica para luego recién aumentar, Doldán (2003) en *E. grandis*, Omonte y Valenzuela (2011) en *E. regnans* y Sette *et al.* (2016) al observar los perfiles radiales por densitometría de rayos x en muestras de *Eucalyptus grandis*.

En la dirección longitudinal Alzate *et al.* (2005) en *E. grandis*, *saligna* y *grandis x urophylla*, determinaron que la densidad básica decrece de la base al 50 % de la altura comercial para luego aumentar hacia la parte superior de la copa, mientras que Arango *et al.* (2001) encontraron que el patrón de variación longitudinal de la densidad básica para *E. grandis* decrece de base hasta DAP, para luego aumentar hasta un 75 % de la altura total.

2.3.2 Estabilidad Dimensional

El comportamiento higroscópico que presenta la madera es uno de los temas de estudio que pueden considerarse como indispensables para un buen aprovechamiento del recurso forestal en la fabricación de distintas manufacturas. Independientemente de su uso interno o externo, es necesario determinar el efecto de las condiciones climáticas sobre el cambio de humedad y de forma en la madera (Fuentes *et al.*, 2002).

La estabilidad dimensional es la propiedad que determina los cambios que puede experimentar una pieza de madera cuando pierde o absorbe humedad. Comienza cuando la madera pierde toda el agua que se encuentra dentro de los lúmenes celulares y en los espacios intercelulares (agua higroscópica) y se expresa como porcentaje de las dimensiones originales de la pieza (Fornes y Pan 2003).

Todas las maderas sufren alguna modificación de sus dimensiones cuando el tenor de humedad es alterado. Esas variaciones dimensionales ocurren cuando la fluctuación en la humedad de la madera baja del punto de saturación de las fibras, el cual tiene gran importancia para el proceso de secado y es considerado por numerosos autores entre el 28 al 30 % (Trugilho y Vital 1996).

La contracción y expansión higroscópica son dos de los problemas prácticos más importantes que se producen durante el uso de la madera como material, por lo que determinar estas propiedades es indispensable para adecuar los usos de los productos a obtener (Oliveira y Silva 2003).

Estas propiedades son responsables en gran medida, de los inconvenientes y dificultades que se encuentran en la madera. Se la asocia generalmente a las grietas y deformaciones en las piezas aserradas y es considerada uno de los principales problemas relacionados en la producción de madera de eucalipto para usos sólidos (Crespo *et al.*, 2008).

Por lo general, la estabilidad dimensional de la madera se indica en función de la determinación de la contracción normal (de verde a 12 % de contenido de humedad), de la contracción total (de verde a anhidro) y de su anisotropía.

Fogliá (2005) menciona que los valores promedios de contracción total para madera normal de la mayoría de las especies comerciales, se encuentran dentro de los siguientes rangos:

- Longitudinal: 0,1 - 0,3 %.
- Radial: 2,0 - 8,0 %.
- Tangencial: 3,5- 17,0 %.

Los valores de contracción que presenta una especie nos permiten especificar la sobredimensión necesaria para que una pieza de madera, después de secada, tenga las dimensiones requeridas. Como también, determinar cuánto se moverá una vez puesta en servicio si sufre cambios en su contenido de humedad.

2.3.2.1 Origen de la contracción e hinchamiento

Trughillo y Vital (1996) en su investigación, mencionan que Zhang (1994) determinó que la estructura anatómica de la madera era la responsable de la contracción volumétrica y que dependía principalmente del porcentaje de fibras, de vasos y de parénquima axial.

El fenómeno de la contractibilidad en la madera, se produce cuando las moléculas de agua que se encuentran unidas por enlaces de hidrogeno a las microfibrillas que forman las paredes celulares (agua de adsorción), son forzadas a salir. Al eliminar estas moléculas de agua por difusión y evaporación quedan espacios en las paredes celulares, donde por fuerzas de cohesión las microfibrillas tienden a aproximarse, lo que provoca la contracción de la madera. El fenómeno inverso de expansión se produce cuando el agua es adsorvida por la madera, esta tiende a penetrar entre las microfibrillas causando por lo tanto la separación de ellas y el consecuente hinchamiento de la pieza de madera (Oliveira *et al.*, 2010).

2.3.2.2 Variabilidad de la contracción e hinchamiento

Las variaciones dimensionales normalmente ocurren en valores diferentes en las diversas direcciones de crecimiento del árbol, como consecuencia de la característica anisotrópica que posee la madera. La mayor alteración dimensional de la madera se

manifiesta en la dirección tangencial a los anillos de crecimiento, seguido por la dimensión radial y siendo prácticamente insignificante en la dirección longitudinal (Trughillo y Vital 1996).

Kollman y Côté (1968) mencionan que la diferencia entre la contracción tangencial y radial puede explicarse por la influencia restrictiva de los radios que dificultan la variación en el sentido radial, como así también por la estructura de la pared celular, específicamente a la diferente disposición helicoidal de las microfibrillas en las paredes tangenciales y radiales (Castro 2002).

Según Trughillo y Vital (1996) la variación dimensional es afectada además de las alteraciones en el contenido de humedad por otros factores como ser la estructura anatómica, la densidad, la composición química de la madera, las tensiones de crecimiento y el tenor de extractivos entre otros. Las aseveraciones de este autor surgen de los estudios de Tsoumis (1991), el cual determinó que tanto los contenidos de extractivos como de lignina influían en los fenómenos de contracción e hinchamiento. Según Tsoumis (1991) la contracción es proporcional al espacio ocupado por los extractivos en la pared celular, por lo que la remoción de estos aumenta la contracción y el hinchamiento. A su vez, expresa que la lignina también ejerce un efecto controlador de la contracción e hinchamiento. Este componente puede contribuir a aumentar la contracción en maderas de alta densidad, porque se ha observado que el contenido de lignina disminuye con la densidad. Las maderas de angiospermas contraen más que las maderas de gimnospermas de densidad similar y eso se atribuye al menor contenido de lignina en las frondosas.

Normalmente, se afirma que la magnitud de la variación dimensional es mayor cuanto más densas son las maderas, autores como Lima (1996), al estudiar la maderas de *E. microcorys*, de 20 años de edad, verificó que la contracción volumétrica total y parcial estaban positivamente correlacionadas con la densidad básica, de forma bastante significativa.

Resultados similares lo obtuvieron Trugilho *et al.* (2002) quienes encontraron que la densidad básica y la variación dimensional de la madera de las especies forestales están correlacionadas positivamente, y que las de mayor densidad presentan mayor variación dimensional (Lopes *et al.*, 2011).

Sin embargo Oliveira *et al.* (2010) contradice esta afirmación, al observar en su trabajo que especies de elevada densidad, como *E. cloeziana* y *E. citriodora*, presentaron

menores valores de contracción que el caso de maderas con menores densidades como el *E. urophylla* y *E. pilularis*.

2.3.2.3 Coeficiente de Anisotropía

Otra forma de evaluar la estabilidad dimensional es mediante el índice o coeficiente anisotrópico, definido por la relación entre las contracciones tangenciales y radiales (T/R).

La importancia de este índice, es que cuanto mayor sea su distancia de la unidad, más propensa será la madera a deformarse y rajarse durante los cambios dimensionales provocados por la variación higroscópica (Oliveira *et al.*, 2010).

Sin embargo el factor anisotrópico tomado de forma aislada, no caracteriza una madera como estable, al contrario, causa una falsa sensación de estabilidad. Coeficientes de anisotropía de contracciones bajos, originados de contracciones tangencial y radial elevadas, revelan una madera con alta inestabilidad dimensional (Rocha 2000).

2.4 Ensayos no destructivos

Se denomina ensayo o evaluación no destructiva, a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales.

Se identifica comúnmente con las siglas: END (ensayo no destructivo) o por su homónimo en inglés NDT (nondestructive testing); y se consideran sinónimos de inspecciones no destructivas y exámenes no destructivos.

En el año de 1941 se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT), la cual es la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Esta sociedad es promotora del intercambio de información técnica sobre los END, así como de materiales educativos y programas. Es también creadora de

estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema americano (Díaz 2013).

En general los ensayos no destructivos proveen datos menos precisos de la variable a medir que los ensayos destructivos o convencionales. Sin embargo, los métodos tradicionales en la mayoría de los casos, suelen ser lentos, costosos y pueden ser un factor limitante cuando grandes volúmenes de muestras deben ser analizadas, inviabilizando la caracterización de una especie o clon dentro de programas de mejoramiento genético.

Con la creciente demanda para el desarrollo de metodologías rápidas para la determinación de propiedades tecnológicas de madera, se han investigado métodos alternativos para reemplazar los tradicionales. Aunque estos métodos proporcionan resultados satisfactorios, su aplicación a la actividad forestal es todavía limitada y requiere mayor investigación. El desarrollo de métodos rápidos, precisos, de bajo costo e industrialmente viables se convierte, por tanto, necesarios para la caracterización y clasificación de materia prima relacionada con la industria forestal (Hein *et al.*, 2017).

Como es bien conocido, la madera es un material muy heterogéneo, presentando variaciones en sus propiedades entre las especies y dentro de una especie (Kollmann y Cote, 1968), entre los clones y dentro de un mismo clon (Tomazello Filho, 1985; Evans *et al.*, 2000) e incluso dentro del mismo individuo en las direcciones radial y longitudinal. Para cubrir toda esta variabilidad y obtener resultados representativos es necesario probar un gran número de muestras, o en algunos casos técnicas que permiten el análisis de la totalidad del material (Pereira *et al.*, 2016).

Por esta razón, el desarrollo de nuevas técnicas instrumentales y metodologías de caracterización para el análisis en tiempo real y para la determinación de varias propiedades simultáneamente de una manera no destructiva, se están volviendo cada vez más popular y exploradas por silvicultores y sectores industriales. En estas pruebas, conocidas como no destructivas, la información sobre el material se obtiene mediante mediciones indirectas, lo que permite rapidez en la colecta de datos y la posibilidad de evaluar un gran número de muestras, favoreciendo la selección de genotipos superiores, incluso bajo condiciones de campo (Hein *et al.*, 2017).

El uso de técnicas no destructivas para la caracterización adecuada de propiedades de la madera debe ser mayormente investigada. En el mundo existe una amplia gama de técnicas de este tipo, entre los instrumentos y equipos más utilizados que se adoptaron en numerosos países para evaluar la densidad de la madera se encuentra el pilodyn

(Thiersch *et al.*, 2006; Monteoliva 2011), resistógrafo (Lima *et al.*, 2007; López *et al.*, 2010; Barría *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2017), densitometría de rayos x (Zumaeta *et al.*, 2009; Arantes *et al.*, 2016; Sette *et al.*, 2016; Pincelli *et al.*, 2017; Zanuncio *et al.*, 2018) y la espectroscopía en el infrarrojo cercano que además de predecir esta propiedad, permite la estimación de numerosas características de la madera.

2.5 Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIRS)

Actualmente en el sector forestal existe una gran necesidad de utilizar métodos de monitoreo y evaluación rápidos y confiables, no solo en el área industrial donde existe una gran preocupación para la evaluación de la estandarización de la materia prima de manera de garantizar estándares homogéneos en el producto final. Sino también en el área de mejoramiento genético donde es necesario métodos que se puedan aplicar a un gran número de árboles de forma de caracterizar diferentes propiedades de manera no destructiva (Samistraro, 2008).

El amplio rango de muestras que pueden ser analizadas por NIRS junto con los avances tecnológicos logrados, han hecho que el número de aplicaciones en los diferentes campos haya crecido considerablemente en los últimos años. Los sectores de mayor uso son el agrícola-ganadero, alimentario, médico, textil, cosmético, polímero, petroquímico, farmacéutico y el forestal (Muñiz *et al.*, 2012).

En el sector forestal se utiliza ampliamente en los últimos años, los estudios realizados han demostrado que es posible investigar varias propiedades tecnológicas de madera.

Los primeros trabajos que utilizaron NIRS y técnicas de análisis multivariante estuvieron orientados a la predicción de la composición química de la madera y a las propiedades del papel para la industria celulósica (Birkett & Gambino 1988; Raymond *et al.*, 2001).

Numerosos estudios también muestran la aplicación exitosa de este método para diferentes tipos de muestras, tanto en madera maciza como en triturada y en la determinación de propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de la madera. Pereira *et al.* (2016) utilizaron esta técnica para evaluar las características morfológicas de la fibra de las pulpas Kraft en *Acacia melanoxylon*, Hoffmeyer & Pedersen (1995) la aplicaron

para analizar la densidad básica y la resistencia de la madera de *Picea abies*. También utilizaron NIRS en el análisis de las propiedades mecánicas de la madera en *Pinus radiata* Thumm & Meder (2001) y en *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* Hein *et al.* (2009). Kelley *et al.* (2004) utilizaron esta técnica para determinar no solo las propiedades mecánicas sino también químicas de la madera en *Pinus taeda*. Poke & Raymond (2006), Fahey *et al.* (2018) para la predicción de contenidos de extractivos, lignina y celulosa en madera sólida de *Eucalyptus globulus* y de *Pinus radiata* respectivamente.

Esta técnica además se usa en análisis de discriminación para conocer el origen del carbón y saber si proviene de bosques nativos o implantados (Davrieux *et al.* 2010; Gonçalves 2016), así como también para la evaluación de su calidad (Andrade 2009) e incluso en la determinación del contenido de almidón en raíces de plantas forestales (Palacios *et al.*, 2001) y hoy en día hasta en estudios ecofisiológicos (Almeida *et al.*, 2018).

Hein *et al.* (2017) en su revisión sobre la técnica NIRS menciona que es cada vez más usada para reemplazar los métodos tradicionales de evaluación de las propiedades de la madera y proporcionar información útil tanto a genetistas y mejoradores forestales como a fabricantes de productos forestales.

Si bien está particularmente adaptada a los programas de mejoramiento donde se deben analizar grandes números de individuos, también se puede utilizar en cualquier aplicación forestal donde se requiere el rápido suministro de datos sobre propiedades de la madera (Schimleck 2008).

Esta técnica es relativamente nueva en Latinoamérica y a fines de los setenta principio de los ochenta, se adquieren varios equipos en esta parte del mundo para el análisis de alimentos y granos, pero por desconocimiento de la técnica, fue sólo en los años noventa que en Brasil se utilizó con éxito (Moncada 2006).

Si bien es empleada desde hace varios años en distintas partes del mundo, hasta el momento son muy pocos los estudios que han registrado su uso en Argentina, Zossi *et al.* (2010) en caña de azúcar y en el estudio de medicamentos en el Centro NIR-Raman de Jenck S.A. (2010) son un ejemplo de ellos, sin embargo con fines forestales aún son incipientes las publicaciones de su aplicación.

En cuanto a la evaluación de propiedades físicas existe en la literatura numerosos trabajos que utilizan esta técnica para analizar la densidad de la madera (Acuna y Murphy 2007; Hein *et al.*, 2009; Viana *et al.*, 2009; Gouvêa *et al.*, 2011; Costas *et al.*, 2018), sin

embargo pocos de ellos han sido abordado utilizando NIRS para evaluar la contracción de la madera (Bailléres *et al.*, 2002, Taylor *et al.*, 2008; Kokutse *et al.*, 2010).

2.5.1 Aspectos Básicos de la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano

En términos generales, la espectroscopía es el estudio de la interacción de la radiación electromagnética y la materia con absorción o emisión de energía radiante. Esta técnica está prácticamente orientada a la determinación y cuantificación de compuestos orgánicos, los cuales se caracterizan por la presencia de grupos funcionales como -OH, -NH, -CO y -CH en las muestras que se analizan (Shenk *et al.*, 2001).

Se basa en la espectroscopia vibracional que monitorea los cambios en las vibraciones moleculares íntimamente asociados con cambios en la estructura molecular (Bailléres *et al.*, 2002).

Cuando un compuesto orgánico es expuesto a una radiación electromagnética ciertas longitudes de onda se absorben y otras no, ello dependerá de la propia estructura con que esté constituida la muestra (composición y naturaleza de los enlaces presentes en sus moléculas) y de la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente. Para que la radiación se absorba, la frecuencia de la vibración molecular de determinados enlaces del material debe coincidir con la frecuencia de la radiación electromagnética (Benavides 2006).

La energía absorbida en forma de radiación se transforma en energía mecánica (vibracional) e induce al movimiento de los átomos unidos por uniones químicas a las moléculas, produciendo un aumento en la amplitud en la vibración y provocando el paso a un estado vibracional superior. Es decir, que en una molécula los átomos ocupan posiciones fijas que vibran dentro de un determinado espacio y cuando absorbe cierta cantidad de energía se producen cambios de posiciones de los elementos de la molécula ya que la radiación que penetra excita los modos de vibración (Figura 2) (Rosso 2010).

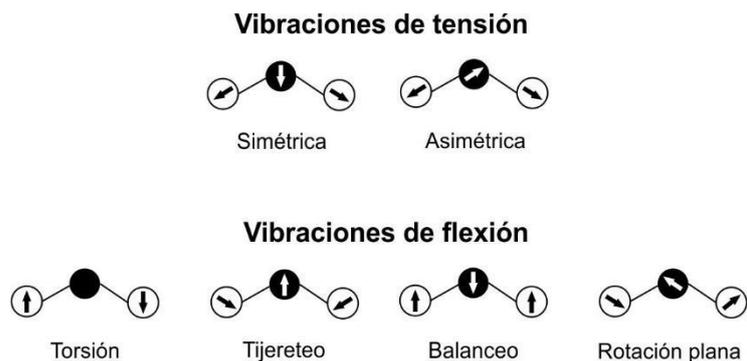


Figura 2. Modo de vibraciones de los átomos. Adaptado de Hein 2008

La cuantificación de esa energía absorbida por los grupos funcionales de las moléculas de la muestra se efectúa indirectamente por la cantidad de energía reflejada, que es captada por los detectores del instrumento NIR. De esta forma, los espectros recogidos en la región infrarroja se representan gráficamente como la intensidad de la energía absorbida en función de la longitud de onda (Figura 3) (Benavides 2006).

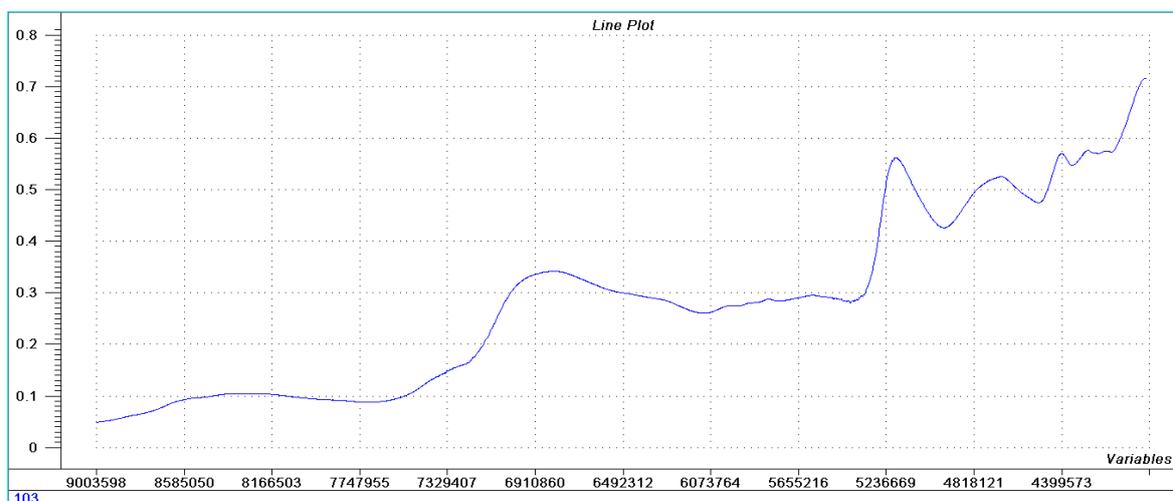


Figura 3. Forma del espectro de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*

Pero como la interacción de la energía con la materia responde a la ley de Beer-Lambert, que establece que la absorbancia a cualquier longitud de onda es proporcional al número o concentración de moléculas absorbentes presentes en el camino recorrido por la radiación (Alomar y Fuchslocher, 1998). En un material de naturaleza química heterogénea como es la madera, el espectro obtenido en la región NIR es una combinación de bandas de absorciones parciales sobrepuestas o muy cercanas, que

suelen confundirse en una línea suavizada, en que se encuentran picos y valles, (Figura 4) (Osborne *et al.*, 1993).

Por lo tanto para Burns y Ciurczak (2008) la cantidad de luz que absorbe, transmite o refleja una muestra en la región del infrarrojo cercano, consiste en fajas de sobreposición constituidas por sobretonos o armónicos y bandas de combinación de vibraciones fundamentales de estiramiento de los grupos funcionales que se producen en la región del infrarrojo medio (Hein 2008).

Según Nisgoski (2005) los espectros obtenidos en la región NIR no son de fácil interpretación debido al elevado número de bandas con fuertes sobreposiciones que presentan, sin embargo son muy útiles porque aporta información de todo el sistema molecular.

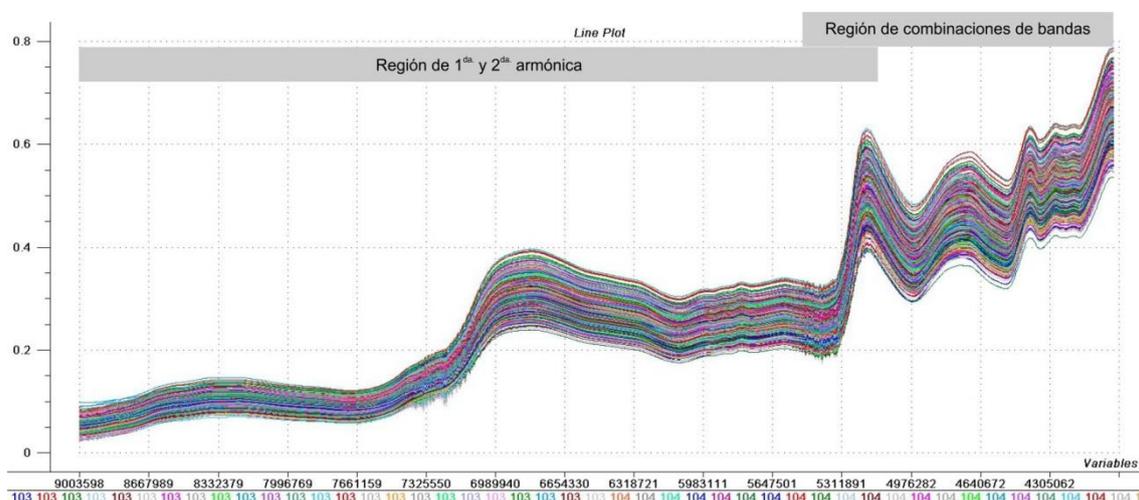


Figura 4 Espectros de absorción de infrarrojo cercano en madera de *Eucalyptus camaldulensis* y las regiones de sobreposición y combinación de bandas de absorción. Adaptado de Hein 2008

En la Figura 4 se observan las regiones de sobreposición y combinación de bandas de absorción en madera. Para Workman & Weywer (2007) citado por Hein (2008), la faja comprendida aproximadamente entre 4000 a 5000 cm^{-1} es la región de combinación de bandas. Esta región está compuesta por muchas sobreposiciones de picos de absorbancia, que son el resultado de la interacción entre diferentes uniones químicas. Si bien es una región informativa que presenta poco ruido, no es tan útil para ser analizada químicamente. El rango entre 5.000 y 9.000 cm^{-1} representa la región de la primera y de la segunda armónica, ésta es una región informativa que presenta muy poco ruido, por lo que suele ser la más utilizada. Por último hay otra región espectral que se extiende de 9.000 a 12.500 cm^{-1} corresponde a la región de la tercera armónica, esta banda espectral

presenta bastante ruido. En este rango, la absorción es de baja intensidad, lo que resulta en mala calidad de la información adquirida.

2.5.2 Historia de la Radiación Infrarroja

Frederick William Herschel por el año 1800 hizo un importante descubrimiento. Él estaba interesado en conocer cuánto calor pasaba a través de los filtros coloreados con los que observaba el sol, para ello, utilizó un prisma de cristal para generar un espectro: el arco iris. Luego midió la temperatura de cada color, notando que cada uno tenía una temperatura mayor que la del termómetro de control fuera del espectro, y que ésta aumentaba al pasar de la parte violeta a la parte roja del espectro visible.

Por último decidió medir la temperatura en una zona un poco más alejada de la zona roja del espectro, al parecer desprovista de luz. Para su sorpresa, descubrió que esta región tenía la temperatura más alta de todas. Herschel había descubierto una forma de luz o radiación ubicada más allá de la luz roja a la que denominó “rayos caloríficos”, los que con el paso del tiempo fueron llamados rayos infrarrojos o radiación infrarroja (Oliveira & Bispo da Silva 2014).

El experimento de Herschel es importante no sólo porque condujo al descubrimiento de los rayos infrarrojos, sino porque fue la primera vez que se demostró que había formas de luz imposibles de percibir con nuestros propios ojos (Triana 2012).

Si bien la teoría de la espectroscopia de infrarrojo (IR) se conoce desde hace más de 200 años, no fue hasta un siglo después, en 1930, cuando Coblentz construyó el primer espectrofotómetro de infrarrojos. Posteriormente, la Segunda Guerra Mundial impulsó la expansión de la tecnología IR como herramienta analítica, especialmente para el análisis de productos del caucho y del petróleo, de manera que el primer espectrofotómetro de infrarrojos comercial estuvo disponible en 1940 y fue entonces cuando la espectroscopia de infrarrojo experimentó un crecimiento significativo (Benavides 2006).

En la siguiente década, los clásicos espectrofotometristas trabajaron con bandas de absorción fundamental, muchas de las cuáles se encontraban dentro del espectro de infrarrojo medio (2500 a 50000 nm). Esta región ganó amplia aceptación y

constantemente recibía progreso tanto teórico como instrumental, mientras que la espectroscopia NIR fue descuidada, ya que en aquellos días, los investigadores estaban convencidos de que los armónicos y las bandas de absorción combinadas que ocurrían en el infrarrojo cercano (NIR) eran de poca importancia y sin ninguna información (Benavides 2006).

Recién por los años 60' y 70' varios investigadores encaminaron sus líneas de trabajo hacia el estudio de esta técnica. Así, en 1968 Ben-Gera y Norris desarrollaron un espectrofotómetro NIR computarizado para el análisis en carne, luego Shenk & Hoover (1976) y McClure & Hamid (1980) siguiendo el liderazgo de Ben-Gera y Norris, construyendo sus propios sistemas NIR para analizar forrajes y tabaco respectivamente (Benavides 2006).

Pero según Pasquini (2003), la década de los noventa fue la que marcó el auge de la técnica. Donde resalta que desde 1930 a 1980, el número total de artículos publicados mediante el uso de la técnica NIRS era de aproximadamente 255, mientras que los años 90' fue un número mayor a 1000. Tal productividad condujo a la aparición en 1993 de la primera Revista de Espectroscopia de Infrarrojo Cercano enteramente dedicada a este campo.

2.5.3 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es una banda constituida por distintas longitudes de onda de radiación electromagnética. Esta radiación varía en sus niveles de energía (disminuye al aumentar la longitud de onda) lo que le permite actuar de diferente manera sobre las distintas sustancias.

Cubre los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, las microondas y las ondas de radio (Figura 5).

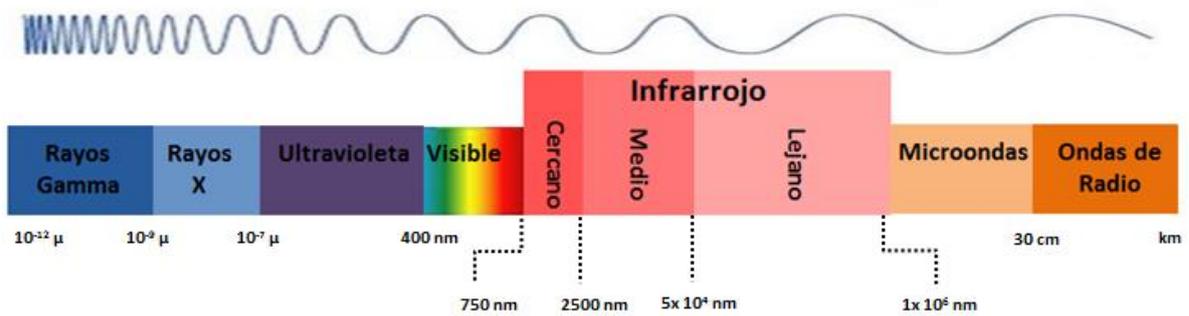


Figura 5. Espectro electromagnético

2.5.4 Región espectral infrarroja

La región del infrarrojo comprende aproximadamente el intervalo espectral de 750 – 1×10^6 nm y según el fenómeno espectroscópico que provoca la absorción de energía, se puede dividir en tres zonas 1) infrarrojo cercano (NIR) de 750 a 2500 nm, 2) infrarrojo medio (MIR) de 2500 a 5×10^4 nm y 3) la región del infrarrojo lejano (FIR) de 5×10^4 a 1×10^6 nm (Bernárdez 2006).

El infrarrojo lejano se encuentra adyacente a la región de microondas, por lo tanto posee baja energía y la absorción de la misma se debe fundamentalmente a las rotaciones moleculares, en el infrarrojo medio proviene de las vibraciones moleculares fundamentales, mientras que en el cercano se debe a los armónicos y bandas de combinación de las vibraciones fundamentales de las moléculas (Peguero 2010).

2.5.5 Tipos de análisis NIRS

El desarrollo de la aplicación de esta tecnología, puede abordarse desde dos enfoques diferentes, de manera cuantitativa o cualitativa (Hein *et al.*, 2017). Ambos análisis se basan en la obtención de espectros de absorción de un conjunto de muestras de características conocidas (conjunto de calibración en análisis cuantitativo y conjunto de aprendizaje en cualitativo), para luego obtener a través de una ecuación de regresión

un modelo quimiométrico, llamado “ecuación de calibración” si se trata de un análisis cuantitativo, o “modelo de clasificación”, en un análisis cualitativo (Moncada 2006).

Si bien en los dos análisis se comparan los espectros de muestras desconocidas con espectros de muestras con características conocidas, la principal diferencia entre cuantitativo y cualitativo se basa en que en este último caso, no es necesario disponer de ningún otro dato adicional (valores de referencia de laboratorio) al dato espectroscópico NIR. Por lo tanto el conjunto de aprendizaje sólo está constituido por información espectral y de la variable categórica misma, por ello se lo denomina también análisis espectral *per se* (García 2002). En consecuencia, resulta necesario tener un completo conocimiento de las muestras que se van a analizar, para que pequeñas diferencias en absorbancia, puedan usarse para separar los espectros dentro de diferentes grupos y poder construir, de esta forma, un modelo de clasificación, que una vez validado, se utilizará para predecir muestras de características desconocidas (Downey, 1996).

2.5.6 Registro de la radiación

Cuando la radiación incide sobre la muestra da lugar a fenómenos de reflexión, absorción y transmisión. (Figura 6)

La intensidad de radiación incidente es igual a la suma de las intensidades de radiación transmitida, absorbida y reflejada tal como se observa en la ecuación (Gamboa 2010).

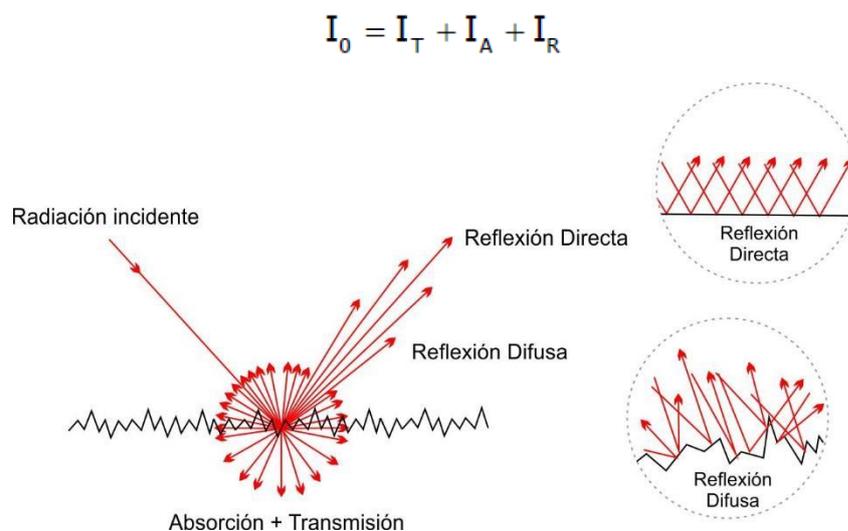


Figura 6. Esquema de incidencia de la luz sobre una superficie

Dependiendo del modo de funcionamiento de los espectrómetros NIR, pueden existir 3 formas de registrar al espectro, ello va a depender de la posición que ocupe la muestra con respecto a los sensores del instrumento. Una buena selección del modo de registro es muy importante, ya que puede mejorar la información que se extrae del espectro (Gamboa 2010).

Los modos de registro pueden ser de transmitancia, reflectancia o transflectancia y se esquematizan en la Figura 7.

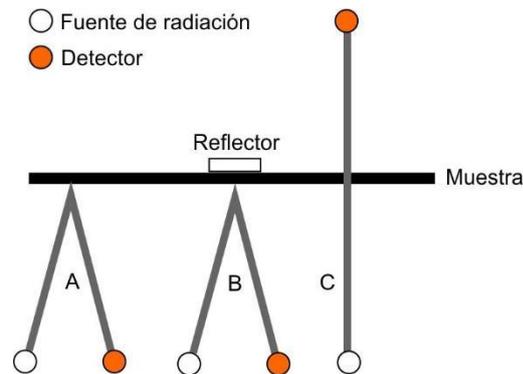


Figura 7. Esquema de los modos de registro de los espectrómetros NIR: A – Reflectancia, B – Transflectancia y C – Transmitancia.

Fuente: Bernárdez (2006)

Reflectancia: Este modo de registro es el más utilizado y el responsable de la gran expansión de la técnica. Es usado para materiales sólidos o semisólidos y se distinguen dos formas de radiación reflejada; la especular y la difusa. Cuando la luz incide sobre una superficie no absorbente, tiene lugar la reflexión especular o directa, como espejo, este tipo de reflexión no aporta información útil sobre la composición de la muestra (Figura 6).

Pero cuando los materiales son débilmente absorbentes a la longitud de onda incidente y la penetración de la radiación es grande en relación con la longitud de onda, predomina la reflectancia difusa (Bernárdez 2006).

Este tipo de reflexión se la define como la radiación reflejada que ha penetrado en la muestra, teniendo lugar en todas direcciones como consecuencia de los procesos de absorción y dispersión (Figura 6) (Gamboa 2010).

En este caso La absorbancia se calcula a través de la ecuación siguiente.

$$A = \log \frac{1}{R}$$

Transflectancia: Este modo de registro es el menos utilizado, es una combinación de transmitancia y reflectancia. Las muestras, generalmente líquidas o semilíquidas, se la coloca en una cubeta junto con el reflector. El haz de radiación incidente entra en contacto con la muestra y la atraviesa, se refleja en el reflector y retorna atravesando nuevamente la muestra, finalmente la radiación es captada por el detector (Bernárdez 2006).

Transmitancia: Se define como la fracción de radiación que atraviesa la muestra, se utiliza para el registro de gases, líquidos, semilíquidos y sólidos. La transmitancia responde a la ley de Beer-Lambert, donde la absorbancia a cualquier longitud de onda es proporcional al número o concentración de moléculas absorbentes presentes en el camino recorrido por la radiación (Barreto 2009).

La absorbancia, asumiendo $I_R=0$, se calcula a través de ecuación:

$$A = \log \frac{1}{T} = -\log T = -\log \frac{I_T}{I_0}$$

2.5.7 Metodología de Trabajo de la Técnica NIRS para análisis cuantitativos - Etapas del proceso de modelado



Figura 8. Esquema de las etapas en la técnica NIRS

El método NIRS esquematizado en la Figura 8 consiste en someter las muestras de madera a la exposición de la radiación infrarroja y analizar la absorción de energía en dicha región. Las muestras utilizadas de las cuales se conoce el valor de la propiedad, siempre y cuando la forma de determinación no altere los espectros generados, son denominadas conjunto de calibración.

Por el contrario, en casos como la densidad básica o la contracción de la madera, donde debe sumergirse las muestras en agua para su determinación, primeramente se debe obtener la información espectral y posteriormente analizan a través de los métodos de referencia las muestras de calibración.

Los espectros obtenidos (datos de absorbancia NIR) son correlacionados con los parámetros de referencia cuantitativos o cualitativos de interés, originando un modelo estadístico llamado "ecuación de calibración" que permite explicar y correlacionar a la mayoría de las informaciones contenidas en ellos (Williams & Norris 2001).

Esta etapa de calibración se lleva a cabo probando distintos tratamientos estadísticos con el fin de simplificar el espectro, de manera de extraer aquellos que sean relevantes en las propiedades analizadas. Finalmente, luego de validar el modelo y de determinar que los parámetros de exactitud y precisión alcanzan valores aceptables, se puede proceder a la determinación de las propiedades de muestras desconocidas, simplemente mediante la medición de su espectro en el equipo NIR.

Según Gamboa (2010) los pasos a seguir son los siguientes:

- A. Elección del grupo o conjunto de calibración: Debe seleccionarse un conjunto que sea representativo de toda la variabilidad tanto física como química de las muestras, de manera de obtener modelos robustos. Una adecuada selección del conjunto de calibración, es quizá, el paso más importante en la construcción del modelo, ya que de ello dependerán los resultados de predicción.
- B. Adquisición de los datos analíticos: En el caso de este trabajo, la adquisición de los espectros NIR.
- C. Método de referencia: Las muestras escogidas deben tener un determinado valor con el que se relacione la información espectroscópica. Estos valores deben ser precisos y exactos, ya que de ellos dependerá la calidad del modelo a desarrollar. Por lo tanto, la bondad del método estará siempre condicionada a la del método de referencia.

D. Pretratamiento de datos: Consiste en cálculos matemáticos que se aplican a los espectros originales. El objetivo es reducir las contribuciones a la señal analítica que no aportan información útil y hacer evidente la señal relacionada con el parámetro de interés. No todos los pretratamientos consiguen ambos objetivos simultáneamente, por lo que la selección del más apropiado es puramente experimental.

Los más utilizados son:

- Promedio de espectros: Este pretratamiento reduce el ruido espectral, ya que el mismo es considerado aleatorio. Consiste en promediar el valor de absorbancia para cada longitud de onda de un grupo de espectros tomados en la misma muestra.
- Suavizado: Este procedimiento reduce el ruido espectral mediante cálculos polinómicos de convolución (Savitzky-Golay) o por Transformada de Fourier. El suavizado se aplica cuando el promedio de espectros no es suficiente ya que la relación ruido/señal es pequeña.
- Corrección del efecto de la dispersión de la luz: Hay distintos análisis que se pueden utilizar como es el caso de Variable normal estándar (SNV, *Standard Normal Variate*) o el de Corrección del efecto multiplicativo de dispersión (MSC, *Multiplicative Scattering Correction*).

Estos análisis son usados habitualmente en espectros registrados en modo reflectancia, ya que reduce el desplazamiento de la línea base debida a la diferencia en el tamaño de partícula. La principal diferencia entre ambos métodos es que el SNV se trata de un escalado independiente de cada espectro, mientras el MSC requiere que se defina un espectro de referencia (corresponde a la media espectral de las muestras) de forma que todas tengan el mismo nivel de esparcimiento que la muestra referencia.

- Corrección de la señal ortogonal (OSC, *Orthogonal Signal Correction*): Este procedimiento permite eliminar la información contenida en los espectros que no está correlacionada con la propiedad a determinar.
- Derivadas: Es uno de los pretratamientos más utilizados ya que permite resolver la baja diferenciación que normalmente presentan los

espectros. La derivación permite aumentar las diferencias entre las bandas anchas y solapadas del espectro y los desplazamientos de la línea base. La primera derivada elimina los desplazamientos de línea base constantes, mientras que la segunda derivada elimina los desplazamientos que varían linealmente con la longitud de onda.

- Selección de variables: Este procedimiento permite eliminar los términos que no son relevantes en el modelado, generando de una submatriz con sólo las variables que poseen información relevante para el modelo.

E. Construcción del modelo (Tratamiento Quimiométrico): Se trata de establecer relaciones matemáticas entre las variables medidas y el parámetro objetivo a través de algoritmos de regresión. Es importante tener cuidado de no sobreajustar el modelo, ya que describiría únicamente el conjunto de muestras utilizadas en la construcción del mismo y no sería capaz de predecir con exactitud nuevas muestras.

F. Validación del modelo: Esta etapa se realiza para comprobar que el modelo predice de forma correcta, se aplica a muestras de las que se conoce el parámetro a analizar y no han sido utilizadas para la construcción del modelo. De esta manera resulta sencillo detectar el sobreajuste.

2.5.8 Construcción del Modelo NIRS

2.5.8.1 *Quimiometría*

Las técnicas instrumentales modernas y especialmente las espectroscópicas, generan gran cantidad de datos en muy corto tiempo. Pero la acumulación de los mismos no significa que genere información útil, Beebe y Kowalski en 1987 manifestaban que “sólo cuando los datos son interpretados y utilizables se convierten en información valiosa” (Gutiérrez 2010).

La complejidad de la información contenida en los espectros debida a las sobreposiciones de bandas de absorción dificulta su análisis, por lo tanto, requiere de la aplicación de técnicas especiales que permitan extraer toda la información contenida en ellos. Es aquí donde la quimiometría juega un papel decisivo, pudiéndose definir como la parte de la química que, utilizando métodos matemáticos, estadísticos e informáticos permite extraer información útil a partir de medidas químicas (Hein *et al.*, 2010).

Por lo tanto, la quimiometría trata específicamente, todos aquellos procesos que transforman señales analíticas y datos más o menos complejos en información. Siendo el principal recurso de interpretación analítica de las informaciones químicas, la calibración multivariada.

Para Gutiérrez (2010) la quimiometría no solo abarca técnicas multivariantes, sino también incluye el filtrado de señales (pretratamientos espectrales) aplicados a los datos experimentales para mejorar la calidad de la señal.

Se define como multivariable aquel modelo (algoritmo matemático) que permite relacionar más de una variable con un parámetro. Traduciéndolo al ámbito de la espectroscopía NIR, es un conjunto de técnicas robustas de interpretación que permiten relacionar un espectro completo o una zona espectral con una propiedad física o química de la muestra (métodos de calibración) en análisis cuantitativos, o establecer agrupaciones de muestras según su similitudes en la señal analítica (métodos de clasificación) en el caso de análisis cualitativos (Gutiérrez 2010).

El principal objetivo de las técnicas multivariantes es establecer modelos que sean capaces de predecir las propiedades modeladas de muestras desconocidas (Gutiérrez 2010).

2.5.8.2 *Técnicas Multivariantes utilizadas para la reducción de variables*

La mayoría de las técnicas espectroscópicas tienen una alta correlación entre los valores de absorbancia medidos a diferentes longitudes de onda. Esta característica es un inconveniente en el desarrollo de métodos basados en cálculos multivariantes debido a la necesidad de que las variables a utilizar sean linealmente independientes. Por lo tanto, la utilización de métodos que permitan la simplificación de los datos y la eliminación

de la colinealidad (cuando dos o más variables son dependientes entre sí) es lo más apropiado (Gutiérrez 2010).

Existen diferentes métodos de regresión, pero en espectroscopia NIR las dos técnicas de estadística multivariada más utilizadas para relacionar ambos tipos de datos (datos espectrales y propiedades de referencia) son el análisis por regresión de componentes principales (PCA) y la regresión mediante mínimos cuadrados parciales (PLS) (Hein *et al.*, 2017).

2.5.8.2.1 **Análisis en Componentes Principales (PCA)**

El análisis en componentes principales es un procedimiento matemático de reducción de variables que permite condensar sin pérdidas relevantes, el gran volumen de información que proporcionan los datos espectroscópicos a la vez que elimina la correlación espectral.

Por lo tanto el objetivo principal del PCA es reducir la dimensión de una matriz X calculando unos nuevos ejes que expliquen la mayor cantidad de información original (Gutiérrez 2010).

Cuando se aplica PCA a un conjunto de variables, como los espectros infrarrojos, el conjunto original de estas variables se sustituye por un nuevo conjunto de variables llamadas componentes principales (PC) o variables latentes. La característica más importante de este nuevo conjunto (PC) es la ortogonalidad, sin embargo, es fácilmente reconstruido a partir de la combinación lineal de las variables originales. El nuevo conjunto de variables (PC) generalmente concentra la mayor parte de la información (varianza) en unas pocas variables, reduciendo así la dimensionalidad de los datos sin pérdida significativa de información química (Muñiz *et al.*, 2012).

Todos los componentes juntos en un modelo proporcionan 100 % de la varianza, el primer (PC) recoge la máxima variabilidad del conjunto de muestras, el segundo recoge una variabilidad inferior y es ortogonal a éste y así sucesivamente hasta que se explica la máxima información relevante (Muñiz *et al.*, 2012).

Un aspecto fundamental en un análisis de Componentes Principales es la elección y determinación del número óptimo de PC, ya que influyen en gran medida en los

resultados de la modelización. Calibraciones con bajo número pueden dar resultados poco satisfactorios, debido a que no se utiliza toda la información espectral disponible, por otro lado, un elevado número puede incluir ruido (Gutiérrez 2010).

Hay diferentes procedimientos descritos para la estimación del número de componentes principales, el más habitual es el de representar la varianza explicada (o varianza residual) en función del número de PC y seleccionar el número mínimo para el cual no se encuentra mejora significativa. Esta elección puede hacerse por visualización del gráfico o bien, aplicando un test F al cociente de las varianzas. En cualquier caso, el número de componentes elegidos debe tener sentido químico y debe ser coherente con lo que se observa en el gráfico (Gutiérrez 2010).

Si consideremos la matriz de datos X , en la cual cada fila corresponde al espectro de cada muestra m y cada columna a la absorbancia a una longitud de onda k . Matemáticamente, las m muestras representaría puntos en el espacio de dimensión k . Por lo que la matriz X estaría formada por $m \times k$ valores de absorbancia (Gutiérrez 2010).

La ecuación desarrollada a continuación, expresa numéricamente la matriz de datos X , la cual se descompone en el producto de 2 matrices: una de scores (T), que son las coordenadas de cada punto en el nuevo espacio y está normalmente asociado a la muestras y una de loadings (P), que son los cosenos de los ángulos formados entre ejes originales con los PC y una matriz (E) asociada al error (Gutiérrez 2010).

$$X = T \times P^t + E$$

2.5.8.2.2 **Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS)**

El principal método de regresión multivariada utilizado para la construcción de modelos que correlaciona un conjunto de respuestas químicas (espectros) y propiedades de referencia de una determinada muestra es el método de mínimos cuadrados parciales (PLS). Se trata de una técnica que generaliza y combina características de PCA y de regresión múltiple, con un algoritmo simple de obtención de respuestas y de buena interpretación química (Acuna y Murphy 2007).

Para Martens y Tormod 1989, este método puede resolver problemas de colinealidad con capacidad predictiva satisfactoria, razón por la cual se aplica

correctamente en datos espectrales. La información variable se comprime y como resultado, los modelos son más fáciles de interpretar y el ruido espectral puede mantenerse fuera del modelo en forma de residuos (Muñiz *et al.*, 2012).

La regresión PLS se utiliza generalmente en dos situaciones, cuando se tiene numerosas variables predictoras (el número de variables independientes puede ser incluso mayor al número de observaciones) o cuando existe multicolinealidad entre las variables predictoras (Blanco 2010).

La suposición básica de la regresión PLS es que el sistema depende de un número pequeño de variables instrumentales llamadas variables latentes (VL). Este concepto es similar al de PC, donde las (VL) son estimadas como combinaciones lineales de las variables observadas. Por lo tanto, la técnica PLS se basa también en una reducción de variables, sin embargo a diferencia del PCA, la descomposición de la matriz espectral se realiza simultáneamente con la matriz de la propiedad a determinar (Blanco 2010).

De esta manera según Gamboa (2010), el método se basa en la descomposición de una matriz **X** (variables independientes) y otra **Y** (variables dependientes). Así, se realiza una descomposición simultánea de ambas matrices obteniéndose unas nuevas variables. En este caso, estos nuevos ejes no corresponden a los de máxima variabilidad, sino que responden a la máxima covarianza entre las matrices **X** e **Y**. Por tanto, la descomposición provoca una pérdida de ortogonalidad en las nuevas variables, pero permite establecer una relación entre las matrices **X** e **Y**. La expresión matemática de la descomposición se expresa en la ecuación:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \times \mathbf{P}^t + \mathbf{E}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U} \times \mathbf{Q}^u + \mathbf{F}$$

Donde **T** y **U** son los scores, **P** y **Q** los loadings y **E** y **F** las matrices residuales.

Según Bernárdez (2006) al ser descomposición de ambas matrices de forma simultánea, se establece una relación interna entre los scores de los bloques **X** e **Y**:

$$\hat{\mathbf{U}} = \mathbf{b} \times \mathbf{T}$$

Donde \mathbf{b} es el coeficiente de regresión para cada uno de los factores del modelo. El cálculo del valor Y de una muestra desconocida se realiza utilizando la relación interna:

$$Y = \mathbf{T}^* \hat{\mathbf{B}} \times \mathbf{Q}^t + \mathbf{F}$$

Donde \mathbf{T} es la matriz de scores de la muestra analizada obtenida del modelo calculado, $\hat{\mathbf{B}}$ es el coeficiente de regresión de cada factor, \mathbf{Q}^t la matriz de loadings del modelo y \mathbf{F} el residual de la predicción.

2.5.8.2.2.1 Ventajas y desventajas del método.

El método PLS obtiene a partir de una matriz \mathbf{X} , una matriz \mathbf{T} cuyos vectores son linealmente independientes definiendo un sistema ortogonal. Por lo que, en casos donde existan un número mayor de variables independientes en relación al número de observaciones ($m > n$) se produce una reducción del modelo. Otra ventaja del método es que para los casos en que exista colinealidad o redundancia entre las variables, la matriz \mathbf{T} se usa para reducir dichas variables lo que permite minimizar el riesgo de cometer un error estadístico al descartar información importante (Blanco 2010).

La desventaja sería que se trata de un modelo correlativo y no causal, en este sentido los modelos que se obtienen no ofrecen información esencial acerca del fenómeno estudiado, ya que no se trabaja con las variables originales (Blanco 2010).

2.5.9 Muestras Anómalas (outliers)

Durante el desarrollo de una ecuación de calibración NIRS, es posible observar ciertas muestras que por diferentes motivos, manifiestan un comportamiento distinto al resto de las presentes en el conjunto de calibración. A estas muestras se las conoce como muestras anómalas (outliers). La anomalía puede ser causada por errores en la

información espectroscópica (instrumental) como en la experimental (método de referencia). La detección y posible eliminación de estas muestras representa una etapa importante en el desarrollo de una ecuación de calibración, ya que la inclusión de las mismas provoca la degradación de la capacidad predictiva del modelo (García 2002).

Para Samistraro (2008) un criterio muy utilizado en la identificación de muestras anómalas, es el gráfico de Resíduos vs Leverage que representa la influencia que tiene la muestra en el modelo de regresión (Figura 9).

Geoméricamente puede ser interpretada como la distancia de una muestra al centroide del conjunto de datos. Si la muestra tiene un valor pequeño significa que está ejerciendo poca influencia en el modelo, en cambio si ese valor es alto y hay una discrepancia en relación al conjunto muestral, quiere decir que están muy alejadas del centro del modelo y por lo tanto puede estar teniendo una influencia negativa en el mismo (Samistraro 2008).

Muestras con elevada varianza residual se consideran outliers (Figura 9 A) mientras que, si se trata de muestras con elevado leverage (Figura 9 B) son consideradas influyentes pero no necesariamente outliers. Pero si existiesen muestras de elevada varianza residual y leverage, las mismas serían consideradas como outliers peligrosos para el modelo.

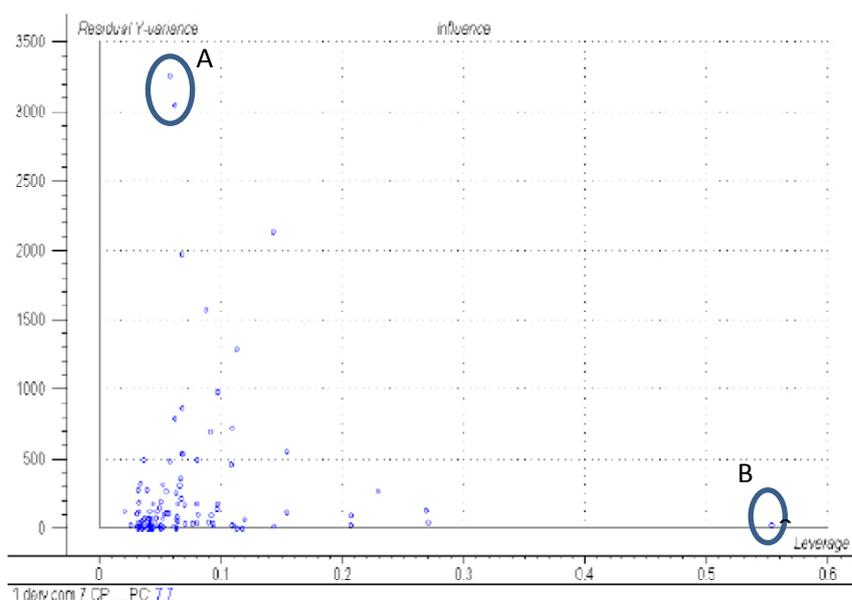


Figura 9. Gráfico de Resíduos vs Leverage que indican los outliers del modelo.

A - Muestras outliers. **B** - Muestras con elevado Leverage.

Adaptado de Samistraro 2008

2.5.10 Validación de modelos

Los métodos de calibración (PCA, PLS) pueden incorporar variabilidad de datos que no necesariamente estén relacionados con la propiedad de interés, para evitar este inconveniente, los datos deben ser cuantitativa o cualitativamente validados. Con ello se logra obtener una estimación de la capacidad de predicción de una ecuación más real que la obtenida durante el desarrollo del modelo de calibración (Aparicio 2002).

La etapa de validación es importante porque sus resultados indican si el modelo construido es adecuado o no para hacer la determinación de los parámetros deseados en las predicciones futuras (Carneiro, 2008).

Según Deming *et al.* (1988) consiste en comparar, mediante diferentes criterios estadísticos, el valor verdadero (determinado mediante el método de referencia) y el valor estimado (valor predicho por la ecuación de calibración).

En esta etapa no solo se mide el grado de concordancia, sino que además se comprueba que no exista un error sistemático entre las predicciones que realiza el modelo y los valores proporcionados por el método de referencia (Aparicio 2002).

Para Scafi (2005) y Ferreira *et al.* (1999) citado por Lopes (2008) la validación puede llevarse a cabo mediante el análisis de un grupo de muestras independiente al utilizado en la calibración y en este caso se denomina validación externa, o bien mediante el análisis basado únicamente en los datos empleados en la etapa de calibración, denominándose validación cruzada.

Según Infracsoft Internacional (1992) la validación cruzada evita el sobreajuste del modelo y permite validar el modelo aun cuando por el número reducido de muestras, no se pueda hacer una validación externa. En este procedimiento, el grupo de muestras de calibración es segmentado repetidamente en subgrupos, reservando uno para validar y usando los restantes en la calibración en forma repetida, hasta que todos los grupos hayan sido empleados en la validación (Moncada 2006).

2.5.11 Estadísticos usados en la selección de modelos

Los criterios utilizados para evaluar los modelos de predicción NIRS no han sido totalmente estandarizados, no obstante existen algunos estadísticos que son de uso muy generalizado.

Dentro de los más utilizados para analizar la robustez de los modelos se encuentran:

- El coeficiente de determinación (R^2): Representa el porcentaje de variabilidad explicada en las concentraciones modeladas por la ecuación de regresión. Se emplea tanto para calibración como para validación. Un R^2 próximo a 0 indica que no existe relación entre ambos métodos y que por lo general los valores de laboratorio son imprecisos, mientras que un R^2 próximo a 1 indica un muy buen ajuste. (Westerhaus, 1989; Shenk and Westerhaus, 1994).

Según Shenk and Westerhaus (1996) calibraciones con valores de R^2 entre 0,89 y 0,69 producen una buena predicción cuantitativa, mientras que con valores comprendido entre 0,6 y 0,5 permiten solo una adecuada separación entre muestras de alto, medio y bajo contenido en un determinado parámetro analítico y calibraciones con valores menores a 0,5 no son muy adecuadas y solo permiten únicamente una separación de muestras en dos grandes grupos: alto y bajo contenido.

- El RMSEC o simplemente SEC, el RMSECV o SECV y el RMSEP o SEP, son los errores estándares de los residuales para el conjunto de calibración, validación cruzada y validación externa, respectivamente (Moncada 2006, Carneiro 2008, Gouvêa 2010).

Se obtienen a partir de la fórmula general del error estándar (SED):

$$SED = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n - 1}}$$

Donde \hat{y}_i dependiendo del error que se quiera estimar va a ser, el valor de la propiedad de interés de la madera para la muestra i estimado usando calibración o el

valor de la propiedad de interés de la madera predicho para la muestra i , en el caso de error estándar de validación, y_i es el valor conocido de la propiedad de la madera para la muestra i , por último n es el número de muestras en el conjunto de calibración o de validación (Acuna y Murphy 2007).

Los valores de error estándar de calibración (SEC) y de validación ya sea (SECV) o (SEP) deben ser de magnitud similar entre sí y mientras más bajos sean mejor será el ajuste del modelo. Delgado (2003) considera que son de magnitudes similares cuando el valor del SEC con respecto al SECV o SEP se diferencia en menos del 20 %.

- El número de variables latentes (VL): Este suele ser otro parámetro relevante en el desarrollo del modelo. Si el número de VL no fuera el adecuado solo perjudicaría al modelo, un número bajo, podría implicar que informaciones importantes no puedan ser modelada, en cambio un número elevado, por más que mejoraría el ajuste del modelo de calibración, incluiría a su vez ruido en el mismo (Carneiro 2008).
- La relación del desempeño del desvío (RPD) es otro parámetro importante y a pesar de no utilizarse muy a menudo, es quizás el estadístico más informativo para la valoración de modelo.

El valor de RPD representa la relación entre la desviación estándar (ds) de los valores de las propiedades medidas por el método convencional y el error estándar de la validación SECV o SEP respectivamente. Según Williams & Sobering (1993) la RPD proporciona la estandarización del error estándar de la predicción y hace posible la comparación de diferentes propiedades.

$$RPD = \frac{ds}{SECV}$$

Un valor de RPD igual a 1,0 indica que el error estándar de predicción y la desviación estándar de los valores de referencia son iguales y la herramienta es incapaz de predecir con precisión el parámetro basado en la calibración (Hein *et al.*, 2009).

En cuanto a la aplicación de modelos de predicción NIRS para utilizaciones en el campo de las Ciencias Forestales, Schimleck *et al.* (2003) consideran que modelos con valores de RPD por encima de 1,5 son satisfactorios para lecturas y predicciones preliminares permitiendo ser usado como una herramienta inicial en el mejoramiento,

mientras que para la selección de árboles en programas de mejora Schimleck & Evans (2004) consideran modelos con valores de RPD de 2,5 como satisfactorios.

2.5.12 Principales ventajas y desventajas de la técnica NIRS

Numerosos autores entre los que se destacan Schultz y Burns (1990); Pasquini (2003); Delgado, (2003); White *et al.* (2006); Hein *et al.* (2017) mencionan que la espectroscopia NIR tiene múltiples ventajas en comparación con las técnicas de laboratorio tradicionales. Entre las principales se resaltan:

- La rapidez del método (lecturas de un minuto o menos por muestra) lo que permite velocidad de respuesta en la toma de decisiones.
- Es un procedimiento no destructivo ni invasivo y con alta penetración del haz de radiación emitida, importante particularmente en el caso de que se disponga de poco material o sea de alto valor.
- Es de uso generalizado para cualquier tipo de producto constituido por moléculas que contengan enlaces CH, NH, SH u OH.
- Posibilita la determinación de más de una propiedad en la misma muestra.
- Prácticamente requiere escasa preparación de la muestra.
- Presenta una precisión próxima a los métodos de referencia y una reproducibilidad mejor que la de éstos.
- Es aplicable en muestras de diferentes estados físicos (sólidas, líquidas y gaseosas), formas y espesores.

Mientras que dentro de las principales limitaciones que presenta la técnica se citan:

- Dificultad para la calibración de los equipos y su alto costo de inversión en etapas iniciales.
- El espectro que se obtienen de las muestras está influenciado por factores no químicos (temperatura, tamaño de partícula, humedad, etc.)

- La competencia técnica que debe poseer el operador y el tiempo requerido para desarrollar una base de datos que permita obtener ecuaciones de calibración robustas que originen predicciones confiables.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Origen y muestreo del material de estudio

El material empleado en esta investigación proviene de un ensayo de progenies de *Eucalyptus camaldulensis* constituido por 13 procedencias australianas, una africana y 2 testigos de semillas comerciales totalizando 104 familias de polinización abierta (Tabla 1). Este ensayo presenta un diseño experimental en bloques de familias compactos con 4 repeticiones, subparcelas lineales de 5 plantas y bordura perimetral simple (López 2004) (Figura 10 A y B).

El año de implantación fue 1996 en la localidad de El Zanjón, Santiago del Estero, (27° 46' Latitud Sur; 64° 18' Longitud Oeste y a 188 m s. n. m.) (Figura 11). Esta región presenta un régimen de precipitaciones de tipo monzónico que varía entre 500 y 550 mm anuales, entre los meses de noviembre y marzo y la evapotranspiración potencial es de 1000 mm anuales. El suelo pertenece al orden Entisoles, gran grupo Torrifuvent, sub grupo Típico, con horizontes A, AC y C, sin limitaciones de profundidad y drenaje. Es un suelo sódico de salinidad leve, con valores de pH que varían entre 7,5 y 10 en sentido horizontal y en profundidad (López 2004).

La temperatura máxima media del mes más cálido (enero) es de 32,5 °C; la temperatura mínima media del mes más frío (julio) es de 2,9 °C y la temperatura mínima absoluta es -7 °C. Las heladas ocurren de Junio a Agosto y hay más de 300 días libres

de ellas. Los vientos predominantes soplan de norte a sur, especialmente en agosto (López 2004).

Tabla 1. Detalle del Material Genético

Procedencia	Localidad	Flia. Seleccionadas	Individuos selectos
A	Emu Creek, Petford, QLD	A6- A2	3 (103-104-510)
B	Huerto Semillero de Zimbabwe, África	B3-B8-B9-B11-B12	6 (125-166-196-516-614-629)
C	Dimbulah, Petford, QLD	C5-C6-C9	4 (150-157-211-458)
D	Gibb River, Kimberley, WA	D1-D2-D3-D4-D7-D9	6 (247-640-627-684-706-718)
E	8 km west of Irvinebank, QLD	-	-
F	South of Katherine, NT	-	-
G	Ord River, WA	G1-G3	2(274-676)
H	Gilbert River, QLD	-	-
I	Dunham River, WA	I1-I3	2 (236-612)
J	Gilbert River, QLD	-	-
K	Wyalba Creek, QLD	K4-K6	2 (300-584)
L	Kimberleys, WA	-	-
LL	Lennard River, WA	LL8	2 (605-606)
M	Fitzroy River, WA	M1	2 (647-722)
SA	Testigo comercial de Sudáfrica	-	-
T	Testigo comercial de Mendoza	-	-

Fuente: Adaptado de López 2004

Se utilizaron 29 individuos seleccionados por medio de un ranking elaborado a partir del mérito genético obtenido en base al DAP y densidad estimada indirectamente con pilodyn mediante índices de selección (González *et al.*, 2011) en el marco del proyecto CICYT UNSE N° B: 23/B091 denominado Evaluación de la calidad de madera de *Eucalyptus camaldulensis* en Santiago del Estero con métodos no destructivos.

Los individuos escogidos en la investigación, son los que presentaron las mejores características fenotípicas (forma y altura) dentro de las familias que integraban dichos índices.

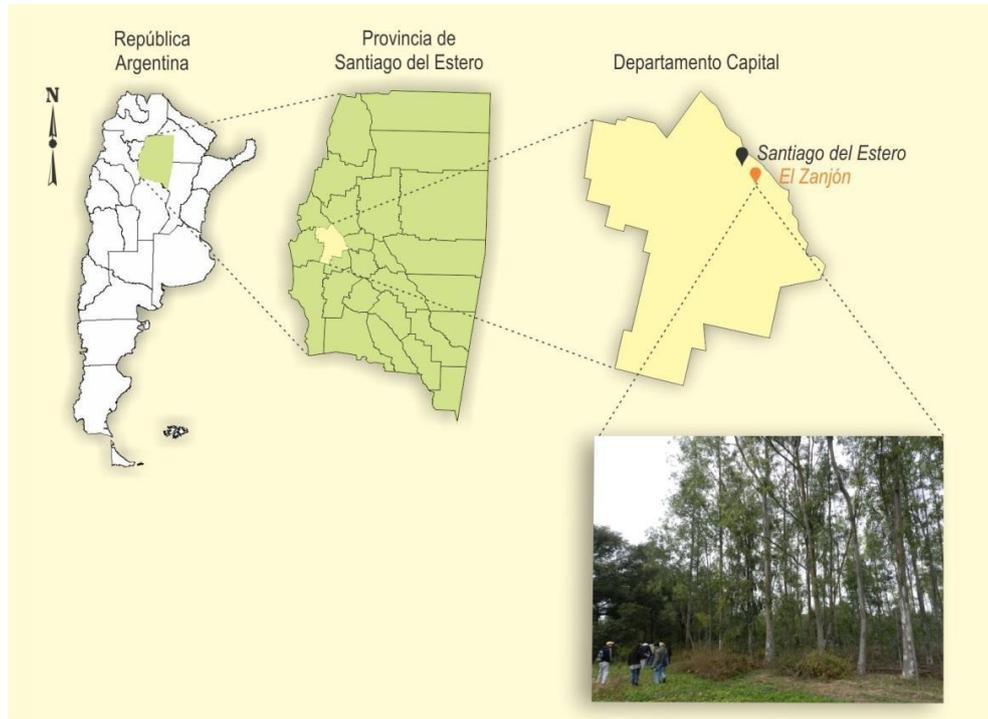


Figura 11. Localización del ensayo genético de *Eucalyptus camaldulensis*

Luego de seleccionados, se procedió al muestreo destructivo de los mismos a fin de extraer el material de ensayo (Figura 12 A). Para obtener las muestras se tomaron trozas de 1,2 m a partir del diámetro a la altura del pecho (1,3 m del nivel del suelo) y se procedió a la extracción de probetas de ensayo según el esquema de la Figura 13. La elección del Dap como altura de muestreo se realizó en base a numerosos estudios (Higa *et al.*, 1973; Phillips 1963; Ladrach 1984 Milagres 2008) que consideran a esta altura representativa del valor promedio de la propiedad en todo el árbol. Se pintaron los extremos de las trozas obtenidas con pintura asfáltica, para impedir una desecación rápida y evitar el consecuente rajado del material (Figura 12 B).

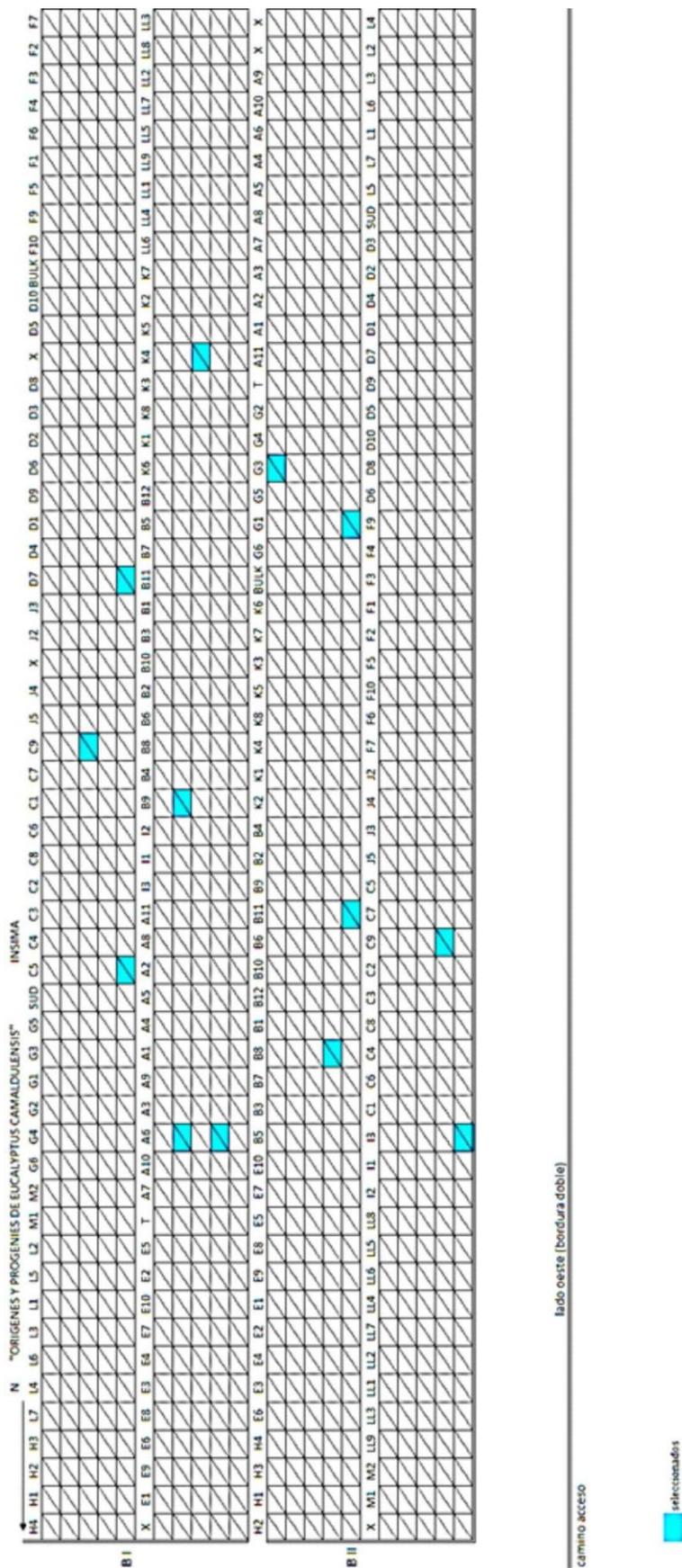


Figura 10. A- Esquema del diseño de Ensayo de Progenie y distribución de Orígenes/procedencias y familias en bloque I y II

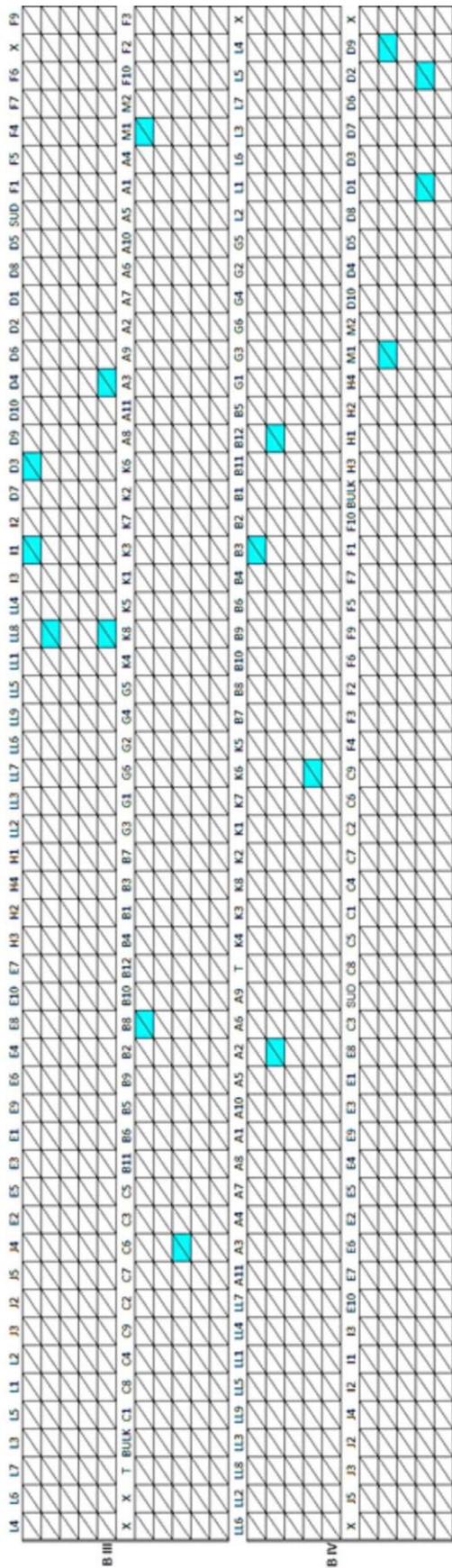


Figura 10. B - Esquema del diseño de Ensayo de Progenie y distribución de Orígenes/procedencias y familias en bloque III y IV

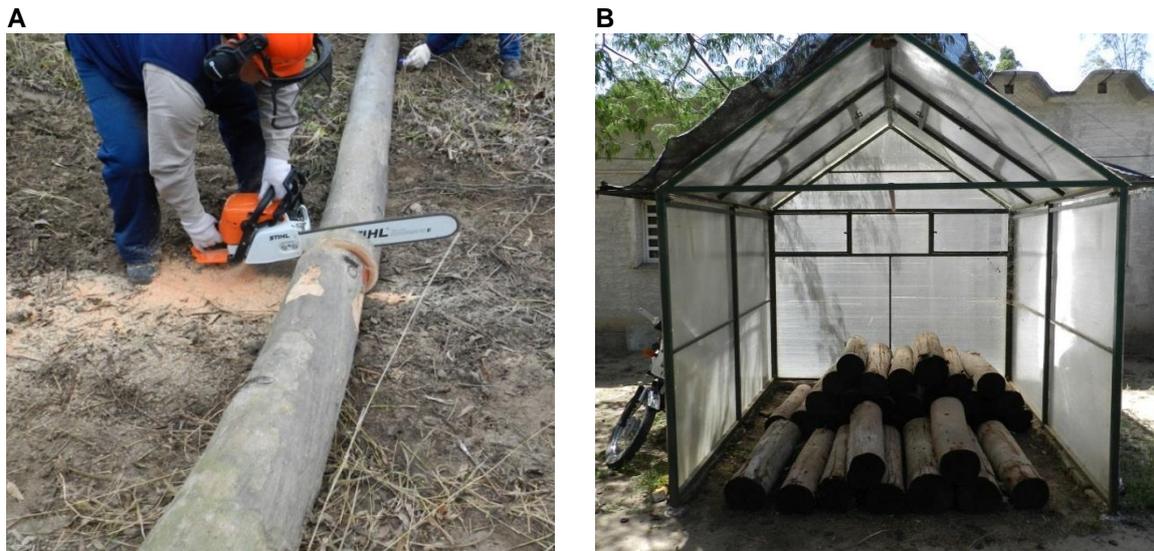


Figura 12. A - Abatimiento y trozado de árboles seleccionados para aserrado. **B** - Estibaje de las trozas con extremos pintados para evitar rápida desecación

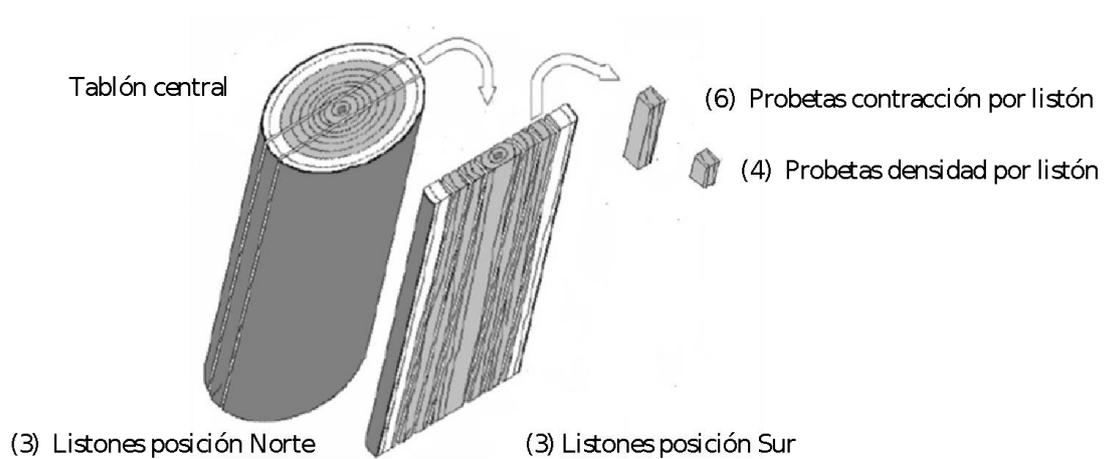


Figura 13. Esquema de extracción de muestras para determinación de propiedades

3.2 Elaboración de las probetas de ensayo

Las trozas se trasladaron al ITM (Instituto de Tecnología de la Madera) perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la UNSE, donde se aserraron en tablones centrales con orientación Norte – Sur, tomando en cuenta la orientación de los

anillos de crecimiento y siguiendo los procedimientos establecidos en la norma internacional ISO 3129 (Figura 14 A). Después de secar los tablones centrales al aire libre (bajo galpón con buena circulación) hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico de manera natural, comenzó la preparación definitiva de las probetas de ensayo.

A efectos de cuantificar la variación en sentido radial de las propiedades y tomando en cuenta la orientación de los anillos de crecimiento, se extrajo de cada tablón 3 listones de posiciones equidistantes en dirección radial médula - corteza (interna, media y externa) en cada orientación, con una sección transversal aproximada de unos 5 por 5 cm (Figura 14 B). Posteriormente, de cada uno de los listones fueron elaboradas las probetas destinadas a los ensayos de las propiedades físicas, previo maquinado a las dimensiones que establecen las normas utilizadas. Las dimensiones finales de las muestras para densidad básica fueron de 2 x 2 x 2 cm, de acuerdo a la norma IRAM 9544, y para contracción las dimensiones fueron de 2 x 2 x 3 cm en las direcciones tangencial, radial y axial respectivamente, según la norma ISO 4469.



Figura 14. A - Transformación de trozas en tablones centrales de dirección Norte-Sur. **B** - Elaboración de listones para obtención de probetas en diferentes posiciones radiales.

Una vez cortadas las probetas durante un laborioso y exhaustivo trabajo se seleccionaron 4 probetas para la determinación de densidad básica libre de defectos por listón (repeticiones) y 6 para contracción e hinchamiento totalizando un número de 60 muestras por individuo. La parte de listón sobrante se conservó como material de reserva.

Las probetas elegidas se acondicionaron con lija de grano N° 120 (Figura 15) a fin de retirar las marcas provocadas por los instrumentos de corte y el brillo de la madera.

Esto deja una superficie áspera, lo que favorece a aumentar la reflectancia difusa y disminuir la especular que se podría producir en las muestras a la hora de la adquisición de los espectros mediante NIRS.



Figura 15. Selección y acondicionamiento de probetas

3.3 Determinación de la densidad básica

Para establecer esta propiedad se determinó el volumen saturado (cm³) y el peso seco (g) de las muestras.

La fórmula utilizada en el cálculo fue la siguiente:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_u}$$

ρ_b =Densidad Básica

M_s =Peso de la muestra seca

V_u =Volumen en estado saturado

El peso seco fue determinado mediante el secado de las muestras en estufa a 103°±2°C hasta alcanzar peso constante (Figura 16). Se considera que llega a este

estado cuando la variación en el peso entre pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de seis horas es menor a 0,01 g.



Figura 16. Obtención de peso seco mediante secado de muestras en estufa

Al ser retiradas de la estufa y antes de proceder a las determinaciones, las probetas de todos los ensayos se enfriaron en desecador de laboratorio conteniendo sílica gel como material desecante (Figura 17).



Figura 17. Peso de muestras con utilización de desecador para evitar absorción de humedad

El volumen verde (saturado) se determinó por el método de desplazamiento de agua, donde se mide el volumen de la probeta de madera en función del peso del líquido desplazado por su inmersión. Para ello se sumergieron totalmente las probetas en un recipiente de vidrio con agua colocada en una balanza electrónica (con precisión de 0,001g) (Figura 18). El peso señalado por la balanza es el volumen en cm^3 de la probeta.



Figura 18. Determinación de volumen verde de las muestras

3.4 Determinación de la contracción e hinchamiento

Para la determinación de la contracción e hinchamiento lineal máximo en las orientaciones radiales, tangenciales, axiales y el coeficiente de anisotropía dimensional, se utilizaron las siguientes formulas:

$$\text{C.máx (\%)} = [(L_s - L_o) / L_s] * 100 \quad \text{y} \quad \text{H.máx (\%)} = [(L_s - L_o) / L_o] * 100$$

Donde

L_s = Es la dimensión, en milímetros de la muestra en estado saturado en la dirección radial, tangencial y axial.

L_0 = Es la dimensión, en milímetros de la muestra en estado anhidro para la dirección radial, tangencial y axial.

El coeficiente de anisotropía de contracción fue dado por:

$$AC = C.\text{máx tangencial} / C.\text{máx radial}$$

Para determinar las dimensiones en estado anhidro las probetas se calentaron en estufa de manera gradual hasta alcanzar $103^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ en 24 horas aproximadamente. Cuando se logró peso constante, se midieron la distancia de cada cara, dimensión a la que se denominó L_0 .

Posteriormente se colocaron las probetas en agua aplicando peso y permaneciendo de esta forma un mínimo de 7 días. Lograda la saturación, se retiraron del agua y se secaron con un trapo húmedo, para posteriormente medir la distancia en cada cara, dimensión a la que se denominó L_s (Figura 19). Para la determinación de las dimensiones se utilizó un calibre digital capaz de registrar 0,01mm para la medición de la cara axial y un tornillo micrométrico para efectuar las mediciones de la cara longitudinal radial y tangencial.



Figura 19. - Medición de longitudes en dirección tangencial, radial y longitudinal en estado saturado

3.5 Adquisición de Espectros NIR

Para desarrollar los modelos predictivos que permita determinar las propiedades físicas de la madera, se utilizó un espectrofotómetro marca Bruker–Tensor 37 (Figura 20).



Figura 20. - Colecta de espectros con espectrofotómetro Bruker – Tensor 37

La interpretación de la información obtenida por este equipo fue registrada por la aplicación del software Opus Spectroscopy versión 4.2. La adquisición espectral fue realizada en el modo absorbancia en la región entre los 9.000 a 4.000 cm^{-1} con una resolución espectral de 2 cm^{-1} , por lo que cada espectro representa un vector de datos (1×3112), referente a la cantidad de información que está entre las bandas de absorción seleccionadas.

El patrón de referencia que utiliza el equipo para calibrar la absorción de luz infrarroja (background), es una base con la superficie enchapada en oro y se utilizó como referencia de prueba de funcionamiento siempre antes del comienzo de cada serie de lecturas. Las medidas espectrales se realizaron en sala climatizada, bajo condiciones controlada de temperatura a 20 °C y 60% de humedad relativa del aire, a fin de estabilizar el contenido de humedad de las muestras.

3.5.1 Colecta de espectros en las muestras

Tanto para la densidad básica como para la contracción e hinchamiento de la madera se tomaron 3 espectros por cara longitudinal de la probeta (planos de sección longitudinal Radial y Tangencial) a fin de captar la variación existente en toda la muestra. Ello totaliza la obtención de 6 espectros por muestras, de los cuales para densidad básica se tomó la media aritmética de las 6 lecturas, a fin de obtener el espectro promedio utilizado para cada muestra (Figura 21-G). Mientras que para la contracción e hinchamiento se promediaron los 3 espectros recolectados de cada cara de la muestra (Figura 21-H).



Figura 21. Toma de espectro en las probetas. **G** - Densidad; **H** – Contracción e Hinchamiento

3.5.2 Construcción de los modelos de calibración

Las calibraciones se ajustaron por el método PLS-1 con un máximo de 12 variables latentes. Para validar los modelos se empleó el método de validación cruzada completa (full cross-validation) y el de validación independiente, ya que según Hein *et al.* (2017) existen numerosos trabajos que demuestran que ambos métodos de validación producen modelos con muy buen desempeño para la predicción de la densidad de la madera. El análisis para detectar muestras outliers (anómalas) se realizó mediante el gráfico de Residuos vs Leverage, mientras tanto la selección de variables espectrales, que según Leardi (2002) es un procedimiento importante para optimizar modelos de regresión, fue analizada por el test de incertidumbre de Martens, disponible para ajustes de modelos PLS del programa estadístico.

Se realizó tratamiento espectral de la primera derivada utilizando el algoritmo de Savitsky y Golay (1964) en el análisis, ya que muchas veces los datos se expresan en

cantidades diferentes o presentan demasiado ruido. Según Delwiche and Reeves (2004) la aplicación de tratamientos contribuyen notablemente en el ajuste del modelo.

Esta etapa al igual que la de colecta de espectros de las muestras se efectuó en Brasil en la Universidad Federal de Lavras y la Universidad Federal de Paraná respectivamente.

En los modelos desarrollados se utilizaron las siguientes rutinas:

- 1- Calibraciones con todas las muestras y variables espectrales.
- 2- Calibraciones sin outliers y con todas las variables espectrales.
- 3- Calibraciones sin outliers y con selección de variables espectrales.
- 4- Calibración utilizando validación independiente

3.5.3 Evaluación de propiedades por medio de NIRS.

Unscrambler proporciona para evaluar la habilidad de predicción y eficiencia de los modelos de calibración multivariada, el error cuadrático medio de calibración (RMSEC), de validación cruzada (RMSECV), de predicción (RMSEP), así como también el coeficiente de correlación (R^2) de calibración y predicción (Gragera 2015). Otro parámetro importante en la evaluación del modelo es la relación del desempeño del desvío (RPD). Este último parámetro se obtiene de la relación entre la desviación de los datos obtenidos por el análisis convencional y el error estándar de la validación cruzada. A menudo este criterio (RPD) es el que mejor determina la eficiencia del modelo (Hein *et al.*, 2009).

3.6 **Análisis de los datos**

El procesamiento de los datos se efectuó mediante el paquete estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2015). El análisis se realizó con modelos lineales generales y mixtos.

$$Y = Xb + Zu + e$$

Donde \mathbf{Y} es el vector de respuesta (datos observados), \mathbf{X} y \mathbf{Z} son matrices de diseño conocidas, \mathbf{b} es el vector de parámetros fijos (posición, orientación y orientación*posición), y \mathbf{u} vector de parámetros efectos aleatorios (procedencia e individuo) y \mathbf{e} (error) son vectores aleatorios no observables, donde las esperanzas matemáticas de \mathbf{u} y \mathbf{e} , se asumen igual a cero

Los modelos mixtos permiten utilizar factores fijos, aleatorios y modelar la heterocedasticidad a través de diferentes funciones de variancia. Para la selección de los modelos se utilizó AIC y BIC y la prueba de razón de verosimilitud. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de comparaciones múltiples LSD Fisher al 5 %.

La relación entre densidad y las contracciones lineales (tangencial, radial) y volumétrica se determinó utilizando el coeficiente de Pearson.

El software que se utilizó para correlacionar a través de la técnica multivariada de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) los datos espectrales para originar los modelos predictivos de cada propiedad fue The Unscrambler® (CAMO AS, Norway), versión 9.7.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de las propiedades físicas

4.1.1 Análisis y resultados de la densidad básica de la madera

El análisis de los valores medios de densidad básica (DB) y sus variaciones en dirección radial para la madera de *Eucalyptus camaldulensis* se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para la densidad básica según posición radial al tronco

Propiedad	Posición médula-corteza	Estadísticos Descriptivos				
		Media	Sd	CV	Min	Max
Densidad básica	Interna	0,59	0,07	11,75	0,45	0,82
	Media	0,67	0,07	10,64	0,52	0,90
	Externa	0,72	0,06	8,20	0,58	0,87
Promedio General		0,66	0,08	12,79	0,45	0,90

Las muestras presentaron un promedio general de DB de 0,66 g/cm³ con valores de 0,59 gr/cm³ para la posición interna; 0,67 gr/cm³ media y 0,72 gr/cm³ externa.

Estos resultados son similares a los encontrados por Moglia *et al.* (2010) de 0,64 gr/cm³ para el mismo ensayo genético cuando las procedencias tenían 9 años de edad. Cinco y Mercado (2005) obtuvieron en una plantación de *E. camaldulesis* procedente de Venezuela valores concordantes a los encontrados en esta investigación de 0,663 gr/cm³. López (2003) a su vez reportó valores ligeramente superiores de 0,69 gr/cm³, mientras que los obtenidos por Cruz (2003) para esta especie en arboles de 25 años de edad fueron de 0,64 gr/cm³.

Oliveira *et al.* (2005) encontraron valores de 0,66 gr/cm³ en *Eucalytus tereticornis*, una especie considerada con características físicas similares y de idéntica edad a la evaluada en este trabajo.

En comparación con los resultados observados en la literatura, se puede afirmar que la DB para la especie se encuentra próxima a los valores reportados por otros autores, donde las pequeñas variaciones se deben probablemente a las diferentes condiciones de crecimiento y edades de los árboles estudiados.

Entre las razones de mayor importancia por las que el uso de la madera de eucalipto es limitado, es por su gran variación intraespecífica. En la Tabla N° 1 se observa que la DB promedio puede tomar valores de 0,45 gr/cm³ como mínimo hasta 0,90 gr/cm³, demostrando una cierta heterogeneidad en las muestras analizadas a pesar de mantener un coeficiente de variación aceptable según Oliveira y Silva (2003) para la propiedad estudiada.

Según Ferreira *et al.* (1979) esta variabilidad puede atribuirse a factores como la procedencia, sitio, espaciamiento, edad y posición en el tronco. Para Delmastro *et al.* (1980) es producto de dos factores principales como lo son las condiciones ambientales en las que crecen los árboles y la alta heredabilidad que posee esta propiedad, por lo que, los individuos de diferentes orígenes o procedencias genéticas, se comportan de diferentes maneras en un mismo ambiente.

La variación en la posición radial (médula-corteza) de la DB presenta una tendencia ascendente hacia la corteza que se muestra en la Figura 22 y en la Tabla 2.

En la tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos y los valores promedios para la DB según procedencias y posición radial médula-corteza.

La procedencia genética A presenta el valor mayor de DB promedio de 0,75 gr/cm³, mientras que el menor corresponde a la B con 0,61 gr/cm³.

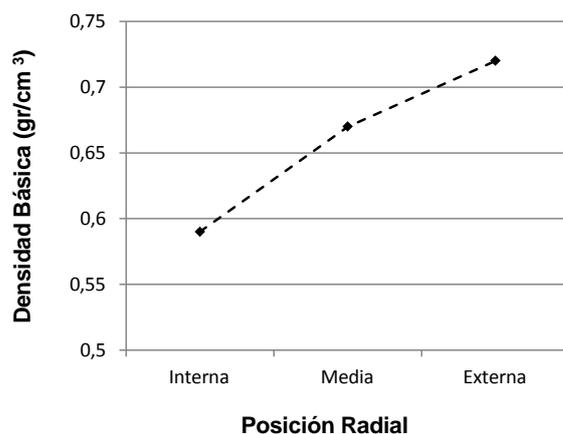


Figura 22. Variación de la densidad básica según posición radial médula - corteza

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para la densidad básica de la madera en función de sus procedencias

Propiedad	Posición	Estadísticos descriptivos	Procedencia								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Densidad básica	Interna	media	0,68	0,53	0,61	0,58	0,61	0,63	0,56	0,61	0,55
		sd	0,08	0,04	0,06	0,03	0,05	0,01	0,06	0,06	0,05
		CV	11,03	8,19	9,65	5,41	8,44	1,54	10,83	9,88	8,39
		Min	0,53	0,45	0,52	0,52	0,52	0,6	0,48	0,52	0,49
		Max	0,82	0,64	0,71	0,65	0,66	0,64	0,63	0,69	0,61
	Media	media	0,75	0,61	0,69	0,65	0,68	0,72	0,6	0,72	0,65
		sd	0,08	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,08	0,08
		CV	10,54	7,21	4,08	6,88	7,64	5,38	6,5	11,66	11,9
		Min	0,63	0,52	0,64	0,57	0,58	0,64	0,54	0,61	0,56
		Max	0,9	0,7	0,77	0,74	0,73	0,77	0,68	0,81	0,76
	Externa	media	0,82	0,68	0,74	0,69	0,71	0,71	0,69	0,69	0,73
		sd	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,06	0,01	0,04	0,06
		CV	5,45	6,32	5,2	6,03	2,71	7,97	1,67	5,26	8,43
		Min	0,74	0,58	0,66	0,6	0,68	0,62	0,66	0,65	0,66
		Max	0,87	0,77	0,82	0,75	0,75	0,78	0,72	0,74	0,82
Densidad Promedio			0,75	0,61	0,69	0,64	0,67	0,69	0,62	0,67	0,64

En la Tabla 3 se advierte además la tendencia ascendente de la densidad hacia la corteza, a excepción de las procedencias I y LL donde el mayor valor corresponde a la posición media del tronco (Figura 23). Tomazello Filho (1985) en *Eucalyptus saligna* y

grandis aseveró que el patrón de variación más común es de aumento de la DB en posición radial médula-corteza, pero observó en *Eucalyptus grandis* un comportamiento de variación comparable al ocurrido en estas procedencias. El determinó que los valores de esta propiedad aumentaban hasta un 25 % del radio del fuste para luego disminuir en las siguientes posiciones del radio, salvo en la parte más externa a la corteza (100 % del radio) donde volvió a aumentar. López (2003) evidenció también valores de DB más altos en la parte intermedia del árbol que cerca de la médula o la corteza en la madera de *E. camaldulensis*, sugiriendo que dicho resultado podría deberse a la cantidad de extractivos presentes en la madera, ya que las probetas para la evaluación de la densidad en la parte exterior fueron en su mayoría de albura y la albura por lo general tiene menor cantidad de extractivos.

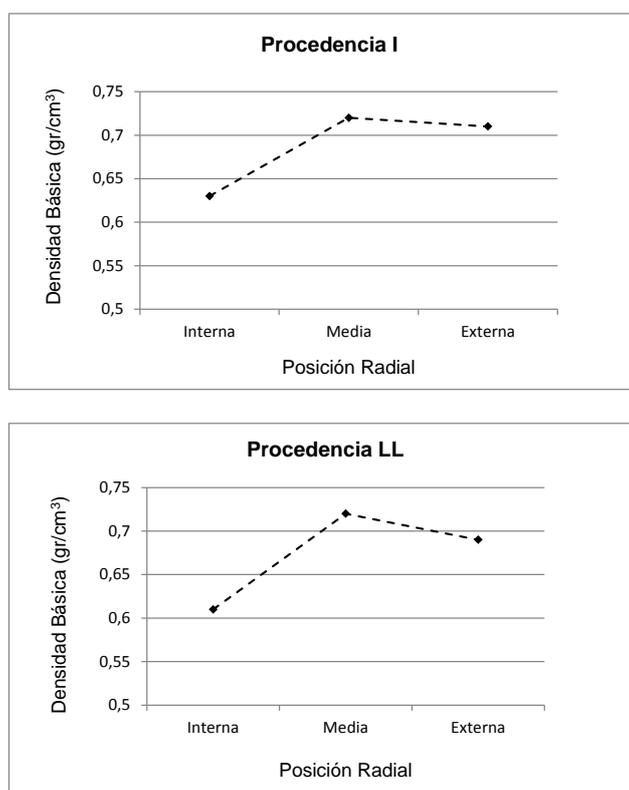


Figura 23. Densidad básica promedio según posición radial médula-corteza en procedencias con diferente comportamiento

Los valores de coeficientes de variación y desviación estándar en todas las procedencia son adecuados para dicha propiedad, observándose que tienden a ser menores en la posición externa al troco en relación a la interna, próxima a la zona

medular (Tabla 3). Los mayores valores en la posición interna puede deberse a estar constituida por madera juvenil, de mayor variabilidad y de menor densidad (Doldán 2003; Potulsky 2010).

Del análisis de los valores para encontrar el mejor predictor lineal insesgado (BLUP) de los efectos aleatorios surge el ranking de DB para las mejores procedencias (Tabla 4). En él se observa que las porcedencias A; C; I; LL y G superan el valor promedio de esta propiedad.

Tabla 4. Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para la densidad básica

Densidad Básica	BLUP
A	0,06
C	0,02
I	0,01
LL	0,01
G	2,10E-03
M	-0,01
D	-0,02
K	-0,03
B	-0,04

4.1.1.1 *Análisis de la variación de la densidad básica según orientación*

El análisis de varianza bajo modelos lineales generales y mixtos arroja que no existen diferencias significativas de los promedios de la DB entre las orientaciones Norte y Sur para todas las muestras analizadas ($p= 0,6475$), ver ANEXO 1.

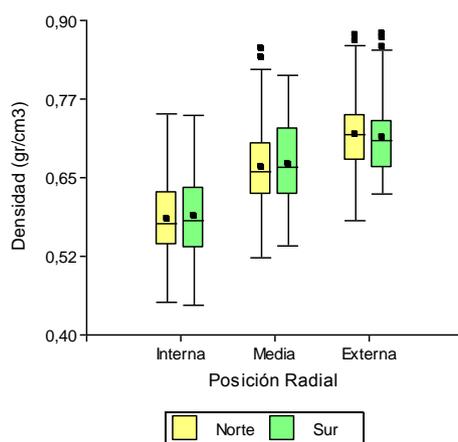


Figura 24. Gráfico de cajas para la densidad básica según posición radial médula-corteza y orientación cardinal

La Figura 24 muestra la similitud de los valores de las posiciones externas, medias e internas en ambas orientaciones cardinales. Similares resultados fueron obtenidos por Raymond *et al.* (2001) en *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* al evaluar la DB con tarugos de incremento.

Igartúa *et al.* (2002) en su investigación sobre *Eucalyptus globulus* no observaron diferencias destacadas entre la DB registrada en los radios de orientaciones opuestas (norte y sur).

Omonte y Valenzuela (2011) también obtuvieron resultados similares al estudiar la variación radial y longitudinal de la DB en *E. regnans*, de 16 años de edad en la costa de la provincia de Arauco, Región del Bio Bío en Chile.

Esta respuesta del comportamiento de la madera según orientación no solo se observa en la DB, sino en otras propiedades que influyen sobre la calidad de madera. González *et al.* (2014) al evaluar las variaciones de las deformaciones residuales longitudinales para estimar las tensiones de crecimiento sobre estos individuos selectos de *Eucalyptus camaldulesis*, tampoco detectaron diferencias significativa en las diferentes orientaciones cardinales.

4.1.1.2 Análisis de la variación de la densidad básica según posición médula-corteza

El análisis de variancia realizado bajo modelos lineales generales y mixtos indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades promedio en función de la posición radial de las probetas ($p < 0,0001$); con mayor valor promedio las probetas de la posición externa (Figura 25), de acuerdo a la diferencia de medias de Fisher (*LSD Fisher*) ver Anexo 1.

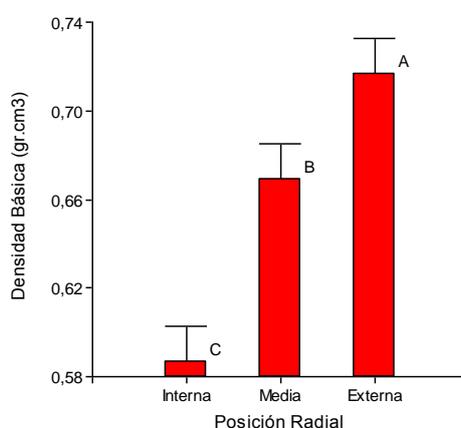


Figura 25. Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para la densidad básica según posición radial médula - corteza

En la Figura 22 y 25 se observa esta tendencia creciente de la DB promedio en posición médula-corteza para la madera de *Eucalyptus camaldulensis*. Este modelo de variación es sugerido por varios autores para la madera de diferentes especies de eucalipto: Ferreira (1972) al determinar la variación de la DB a nivel del DAP en la madera de plantaciones comerciales de *E. grandis* de 11, 12, 13, 14 y 16 años. Tomazello Filho (1985) en *E. saligna* y *E. grandis* de 10 años de edad, comprobó que el modelo de variación de DB estaba caracterizado por el aumento de esta propiedad siguiendo el patrón de variación médula-corteza.

Resultados semejantes también fueron citados por Carmo (1996) en su estudio sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus cloeziana* y *Eucalyptus maculata* en todas las especies se presentó el mismo patrón de variación.

En la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*, López y Staffieri (2003) determinaron en cada especie, un claro patrón de incremento de la densidad en dirección médula-corteza con valores de 437 Kg/m³ en médula y de 554 Kg/m³ en la posición externa para *E. grandis*, mientras que en *E. dunnii* fue de 549,2 Kg/m³ a 708,8 Kg/m³ respectivamente.

Para Oliveira *et al.* (2005) la variación en sentido radial de la DB en la madera de 7 especies de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*, *E. tereticornis*, *E. paniculata*, *E. pilularis*, *E. cloeziana*, *E. urophylla* y *E. grandis*) fue significativa, con una tendencia general de las especies de alcanzar valores más bajos en la región de la médula a aumentar hasta la región próxima a la corteza, aunque cada especie mostró un perfil diferenciado de variación.

Gonçalves *et al.* (2009) en un ensayo clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, observaron la misma tendencia de aumento de la DB de la madera a partir de la médula en dirección a la corteza a la altura del DAP.

Mantero *et al.* (2014) también encontró que en la madera de *Eucalyptus bosistoana* los resultados obtenidos en las muestras cercanas a la corteza fueron las que presentaron los mayores valores de DB promedio; mientras que los menores se registraron en la madera cercana a la médula.

Ya desde los años 80 está claramente demostrado que el modelo de variación más común en el género *Eucalyptus*, es el caracterizado por el aumento de la DB de la madera en la posición radial médula-corteza, como lo afirmaron Rezende y Ferraz (1985), Tomazello Filho (1985) y corroborado actualmente por algunos estudios como el de Arantes *et al.* (2016) al evaluar esta propiedad mediante densitometría de rayos x en clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 6 años de edad y el de González *et al.* (2018) en madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

4.1.2 Análisis y resultados de las contracciones de la madera

Los resultados de los coeficientes de contracciones lineales máximas, volumétrica y del factor Anisotrópico para la madera de *Eucalyptus camaldulensis* en las posiciones

internas, medias y externas en dirección radial médula-corteza se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos para contracciones lineales máximas, volumétrica y factor anisotrópico según posición radial médula corteza

Posición Médula-Corteza	Contracciones (%)	Estadísticos descriptivos				
		Media	Sd	Cv	Min	Max
Interna	Tangencial	11,72	2,54	21,64	7,69	20,52
	Radial	7,26	1,77	24,36	3,72	12,85
	Longitudinal	0,45	0,3	68,06	0	1,44
	Volumétrica	19,43	3,59	18,47	13,44	30,22
	Factor de Anisotropía	1,65	0,37	22,25	0,83	2,96
Media	Tangencial	11,12	1,91	17,14	8,15	16,87
	Radial	7,21	1,4	19,48	4,6	11,06
	Longitudinal	0,44	0,31	70,74	0	1,53
	Volumétrica	18,77	2,85	15,16	13,5	25,55
	Factor de Anisotropía	1,57	0,29	18,15	0,89	2,58
Externa	Tangencial	9,5	1,26	13,3	7,23	14,16
	Radial	7,26	1,37	18,83	3,74	12,22
	Longitudinal	0,38	0,28	73,27	0	1,37
	Volumétrica	17,14	2,31	13,5	12,65	24,43
	Factor de Anisotropía	1,32	0,19	14,61	0,55	2,04
Promedio General	Tangencial	10,75	2,16	20,11	7,23	20,52
	Radial	7,25	1,52	20,94	3,72	12,85
	Longitudinal	0,42	0,3	70,96	0	1,53
	Volumétrica	18,41	3,08	16,75	12,65	30,22
	Factor de Anisotropía	1,51	0,32	21,13	0,55	2,96

Los valores obtenidos fueron de 7,26 % para la contracción radial en la posición interna, de 7,21 % en la media y de 7,26 % para la posición externa, con valores mínimos y máximos de 3,72 % y 12,85 %; 4,6 a 11,06 % y entre 3,74 y 12,22 % para cada posición respectivamente.

En cuanto a la contracción máxima tangencial, se verificó el valor de 11,72 % para la posición interna, de 11,12 % en la intermedia y 9,5 % para la externa, presentando valores extremos de 7,69 a 20,52 %; de 8,15 a 16,87 % y de 7,23 a 14,16 % en sus respectivas posiciones.

Los resultados obtenidos para la contracción longitudinal máxima fueron de 0,38 %; para la posición externa, 0,44 % media y de 0,45 % para la interna, presentando valores límites de 0 a 1,37 %; 0 a 1,53 % y de 0 a 1,44 % respectivamente.

Para la contracción máxima volumétrica se obtuvieron valores de 17,14 % para la posición externa con una amplitud de 12,65 a 24,43 %, de 18,77 % en la parte media y

valores extremos de 13,5 a 25,55 %, mientras que en la porción interna del tronco fue de 19,43 % y amplitudes de 13,44 a 30,22 %.

Los coeficientes de variación de las contracciones lineales máximas y volumétrica se muestran en la Tabla 5, y aunque elevados comparados con otras especies, resultan aceptables para el género eucaliptus. Olivera *et al.* (2010) obtuvieron valores similares al estudiar las contracciones máximas de siete especies de *Eucalyptus*.

Los coeficientes de variación para la contracción longitudinal resultaron extremadamente elevados, esto se debe probablemente a la dificultad de su determinación. Según Klock (2000) los mínimos cambios en las dimensiones longitudinales, exigen alta exactitud en las mediciones para obtener resultados precisos. Spavento *et al.* (2008) afirman que para maderas normales su valor es despreciable en relación a la contracción tangencial y radial, por lo que en la práctica no es de importancia tecnológica para definir el uso de la madera. Teniendo presente estas consideraciones y la de numerosos autores que no evalúan en sus trabajos el comportamiento de la estabilidad dimensional en la sección longitudinal, se optó por no analizarla en los sucesivos estudios.

En la tabla 5 se observa además como los coeficientes de variación tienden a disminuir en posición radial médula-corteza, lo que significa mayor homogeneidad del leño en la posición externa al tronco.

Los valores promedios obtenidos para los individuos analizados son: coeficiente de contracción radial: 7,25 %; tangencial: 10,75 %; longitudinal: 0,42 % y volumétrico: 18,41 % respectivamente. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por López (2003) para la misma especie, con valores de 6,7 % en la posición radial de 12,5 % en la tangencial y 18,81 % para la volumétrica, pero superiores a los encontrados por Tinto (1991) donde detalla valores de contracción en *Eucalyptus camaldulensis* que se encuentran entre 4 % para la radial; 8,5 % en la tangencial y 19,3 % para la contracción volumétrica.

Los resultados obtenidos por Cinco y Mercado (2005) en esta misma especie fueron de 0,23 %; 6,10 % y 9,11 % para las contracciones lineales máximas longitudinales, radiales y tangenciales respectivamente. Mientras que la contracción volumétrica alcanzó valores de 14,3 %.

Junior y García (2004) obtuvieron valores cercanos en *Eucalyptus urophilla* con promedio de 0,11 % y una amplitud de 0,03 a 0,24 % para la contracción longitudinal, de

7,18 % con valores extremos de 4,78 a 9,76 % para la contracción radial y de 12,49 % con mínimos y máximos de 9,77 a 15,48 % para la tangencial, mientras que la contracción volumétrica resulto de 19,77 % variando de 14,59 a 23,34 %.

Cardoso *et al.* (2013) al estudiar la madera de *Eucalyptus tereticornis* reportaron valores medios de 7,04 %; 14,7 % y 20,64 % para la contracción radial, tangencial y volumétrica respectivamente. A su vez dichos autores determinaron valores máximos en la contracción radial de 10,68 %; de 28,22 % para la tangencial y de 33,12 % para la volumétrica, mientras que los valores mínimos fueron de 4,03 %, 5,06 % y 12,24 % respectivamente, con lo que demuestran la gran variación que hay en el material estudiado para esta propiedad.

En base a los resultados presentados se puede decir que la madera de *E. camaldulensis* presentó coeficientes de contracción con valores que se encuentran dentro de los límites observados en la bibliografía.

En la Figura 26 se representa la tendencia general de la especie en función de su posición radial médula-corteza. Aquí se puede observar que tanto la contracción tangencial como volumétrica presenta una tendencia a disminuir en dirección a la posición externa del tronco, sin embargo para la contracción radial esa tendencia es imperceptible.

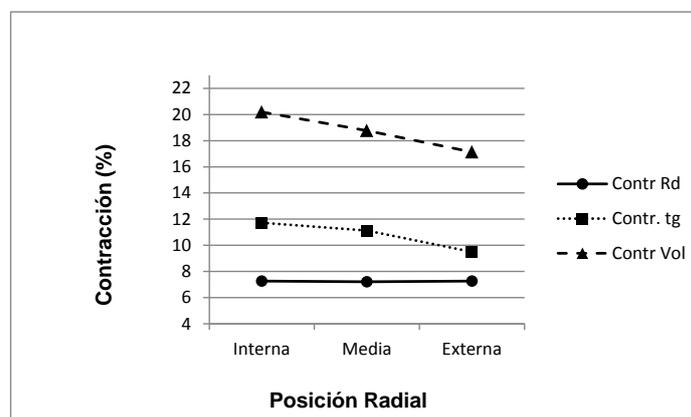


Figura 26. Variación de las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula - corteza

La Tabla 6, 7 y 8 presenta los estadísticos descriptivos para las contracciones lineales máximas y total a nivel Procedencias.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos para la contracción radial de la madera en función de sus procedencias

Posición		Medidas de Resumen	Procedencias								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Contracción Radial	Interna	media	7,57	7,75	7,33	7,06	8,18	7,35	6,79	5,99	6,86
		sd	1,46	2,02	1,95	1,21	2,84	2,32	0,88	0,59	1,54
		CV	19,33	26,12	26,56	17,15	34,69	31,52	12,9	9,81	22,49
	Media	media	6,85	7,98	7,07	7,34	7,53	7,29	6,98	6,23	6,36
		sd	1,19	1,39	1,34	1,14	1,74	1,59	1,63	0,52	0,56
		CV	17,44	17,48	18,98	15,51	23,09	21,8	23,39	8,4	8,74
	Externa	media	6,56	8,12	7,1	7,8	7,37	6,36	6,64	6,53	6,57
		sd	0,91	1,1	1,42	1,56	1,6	0,82	1,22	0,45	0,56
		CV	13,89	13,52	20,02	19,98	21,67	12,88	18,32	6,95	8,54
Promedio general		media	6,99	7,96	7,14	7,43	7,65	7	6,8	6,25	6,6
		sd	1,27	1,54	1,53	1,39	2,05	1,73	1,27	0,56	1,01
		CV	18,2	19,36	21,36	18,67	26,76	24,67	18,66	9,01	15,28

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para la contracción tangencial de la madera en función de sus procedencias

Posición		Medidas de Resumen	Procedencias								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Contracción Tangencial	Interna	media	10,02	12,85	12,61	12,16	15,05	12,53	9,71	9,39	10,06
		sd	0,81	2,56	1,29	1,92	4,27	2,93	0,72	0,41	0,5
		CV	8,07	19,92	10,27	15,83	28,34	23,4	7,4	4,33	4,96
	Media	media	9,62	12,67	11,91	11,32	12,09	10,24	9,68	9,15	9,98
		sd	0,71	1,95	1,37	1,7	2,27	1,24	0,57	0,56	0,72
		CV	7,4	15,37	11,5	15,04	18,75	12,12	5,89	6,17	7,22
	Externa	media	8,6	10,37	9,94	9,48	10,58	8,47	8,93	8,33	9,13
		sd	0,43	1,4	0,95	0,85	1,88	0,48	0,82	0,42	0,79
		CV	5,05	13,5	9,51	9,02	17,74	5,69	9,23	5,07	8,6
Promedio general		media	9,41	11,92	11,35	10,96	12,35	10,41	9,44	8,96	9,73
		sd	0,9	2,29	1,64	1,91	3,33	2,49	0,79	0,65	0,79
		CV	9,54	19,25	14,45	17,43	26,99	23,87	8,37	7,26	8,1

Tabla 8. Estadísticos descriptivos para la contracción volumétrica de la madera en función de sus procedencias

Posición		Medidas de Resumen	Procedencias								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Contracción Volumétrica	Interna	media	18,03	21,02	20,5	19,63	22,76	20,28	17,47	15,72	17,34
		sd	1,66	3,7	3,08	2,25	6,83	4,99	0,79	0,83	1,26
		CV	9,22	17,61	15,02	11,47	30,02	24,61	4,54	5,25	7,29
	Media	media	16,91	21,09	19,34	19,04	20,05	18,05	17,13	15,76	16,82
		sd	1,75	2,34	2,39	2,55	3,69	2,74	2,09	0,89	1,01
		CV	10,35	11,09	12,37	13,38	18,4	15,19	12,21	5,64	6,02
	Externa	media	15,43	18,97	17,24	17,58	18,4	15,22	15,92	15,25	16,5
		sd	0,92	2,14	2,26	1,86	3,34	1,17	1,86	0,39	1,09
		CV	5,94	11,27	13,1	10,57	18,14	7,7	11,71	2,55	6,61
Promedio general		media	16,79	20,34	18,85	18,72	20,11	17,85	16,78	15,57	16,89
		sd	1,82	2,95	2,83	2,39	4,8	3,91	1,84	0,76	1,16
		CV	10,86	14,48	15,02	12,75	23,87	21,92	10,98	4,89	6,9

En estas tablas se advierte como los valores de las contracciones lineales máximas y volumétrica en la mayoría de los casos sigue la tendencia vista en la Figura 26, a excepción de las procedencias LL y D donde se observa que existe una tendencia a aumentar hacia la posición externa del tronco para la contracción radial (Figura 27), dirección observada por varios autores no solo en contracción radial, sino también en tangencial y volumétrica.

Al observar los estadísticos descriptivos para cada procedencias en las diferentes contracciones (Tabla 6, 7 y 8) se observa que el comportamiento de la madera de la procedencia LL muestra los menores valores y presenta el menor coeficiente de variación por lo que se trataría de una procedencia con menor probabilidad de ocurrencia de defectos en la fase de secado.

El IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) en 1985 citado por Junior y García (2004) considera que maderas con contracción volumétrica entre 12,33 y 19,39 % se califican como de contracción media, y con valores superiores a 19,40 % son consideradas de contracción alta.

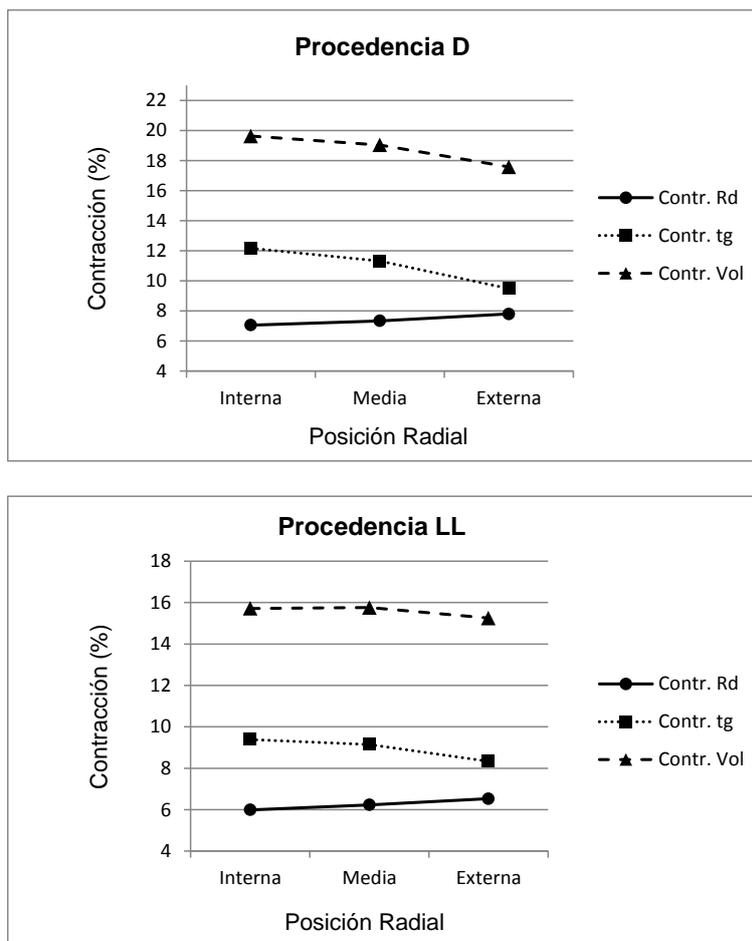


Figura 27. Contracciones lineales máximas y total según posición radial médula-corteza en procedencias con diferente comportamiento

Fuentes *et al.* (2002) citan criterios sugeridos según la base de datos Prospect, versión 2.1 (1997) para calificar el movimiento dimensional de la madera en función de su contracción total tangencial y radial (β_{\max} , de verde a 0 % C.H.). Al respecto la Tabla 9 muestra dicho criterio.

Tabla 9. Clasificación de la contracción (β_{\max}) al disminuir la humedad de la madera del estado verde a 0 %

Categoría	Contracción Radial %	Contracción Tangencial %
Muy Pequeña	< 3,0	< 5,0
Pequeña	3,1 – 4,0	5,1 – 6,5
Moderada	4,1 – 5,0	6,6 – 8,0
Ligeramente grande	5,1 – 6,0	8,1 – 9,5
Grande	> 6,0	> 9,5

Fuente: Fuentes *et al.*, 2002

De acuerdo a los criterios mencionados, las contracciones lineales máximas y volumétrica de la madera de las diferentes procedencias presentan un predominio a ser ligeramente grandes a grandes.

Es importante observar al evaluar la desviación estándar y el coeficiente de variación en la tabla 6, 7 y 8 que los valores indican que a pesar de producir madera de elevada contracción, la variabilidad de esta propiedad es moderada para especies de rápido crecimiento, evidenciando cierta homogeneidad en su madera, dichos valores se corresponden a los normalmente encontrados en la bibliografía.

Algunos autores sostienen que cuanto más alta la densidad de la madera mayor es su contracción e hinchamiento, sin embargo para el género *Eucalyptus* existe una cierta controversia en esta afirmación. En este caso en particular, la procedencia A fue la que mayor densidad básica presentó ($0,75 \text{ gr/cm}^3$) sin embargo sus contracciones resultan cercanas a las obtenidas para la procedencia LL de menor valor. A su vez, las investigaciones llevadas a cabo tanto por Tinto (1991) como por Doldán (2003) refleja claramente esta contradicción. El primer autor determinó valores de contracción radial, tangencial y volumétrica de 4 %; 8,5 % y 19,3 % para la madera de *Eucalyptus camaldulensis*, mientras que Doldán (2003) encontró valores de 4,61 %; 8,11 % y 12,72 % en la madera de *Eucalyptus grandis*. Lo que demuestra que especies de densidades muy distintas pueden tener valores de contracción bastantes similares.

En el análisis de los valores para encontrar el mejor predictor lineal insesgado (BLUP) de los efectos aleatorios surge el ranking de las diferentes contracciones lineales y totales para las mejores procedencias (Tabla 10). En este ranking se observa como las procedencias LL; A; M; K e I se encuentran por debajo del valor promedio de esta propiedad.

Tabla 10. Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para la contracción de la madera

Contr. Rd	BLUP	Contr. Tg.	BLUP	Contr. Vol.	BLUP
LL	-5,30E-07	LL	-0,7	LL	-0,76
M	-3,60E-07	A	-0,6	A	-0,56
K	-2,30E-07	K	-0,5	M	-0,39
A	-2,20E-07	M	-0,4	K	-0,36
I	-1,50E-07	I	-0,1	I	-0,13
C	-8,60E-08	D	0,22	D	0,24
G	1,30E-07	C	0,53	C	0,36
D	3,50E-07	G	0,64	G	0,5
B	1,10E-06	B	0,87	B	1,1

4.1.2.1. Análisis de la variación de las contracciones según orientación

El análisis de varianza arroja que no existen diferencias significativas de los promedios de todas las contracciones (β Rd. $p= 0,8969$; β Tg. $p= 0,7098$ y β Vol. $p= 0,7778$) entre las orientaciones Norte y Sur para las muestras analizadas (ANEXO 2).

La Figura 28 muestra visiblemente como los valores de las posiciones externas, medias e internas son similares en ambas orientaciones cardinales para las diferentes contracciones.

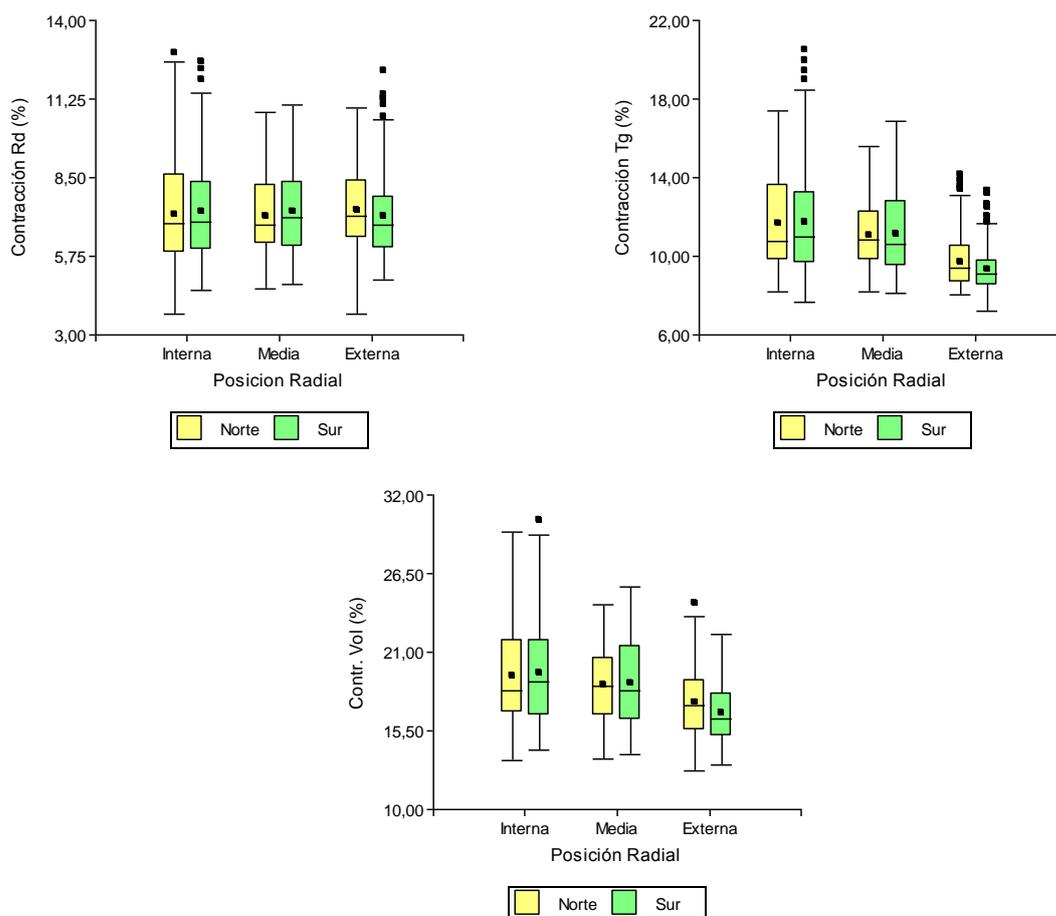


Figura 28. Gráfico de cajas para las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula-corteza y orientación cardinal

4.1.2.2 Análisis de la variación de las contracciones según posición médula-corteza

El análisis de varianza realizado mediante modelos mixtos generales determinó que existen diferencias significativas entre los promedios para las posiciones externa, media e interna para el caso de la contracción tangencial y volumétrica ($<0,0001$), no así en la contracción radial donde no fue estadísticamente significativas ($p= 0,9434$). (ANEXO 2). La prueba de diferencia de medias (Figura 29) que arrojó estos resultados se llevó a cabo bajo el análisis LSD Fisher ($\alpha=0,05$), ver tabla en ANEXO 2.

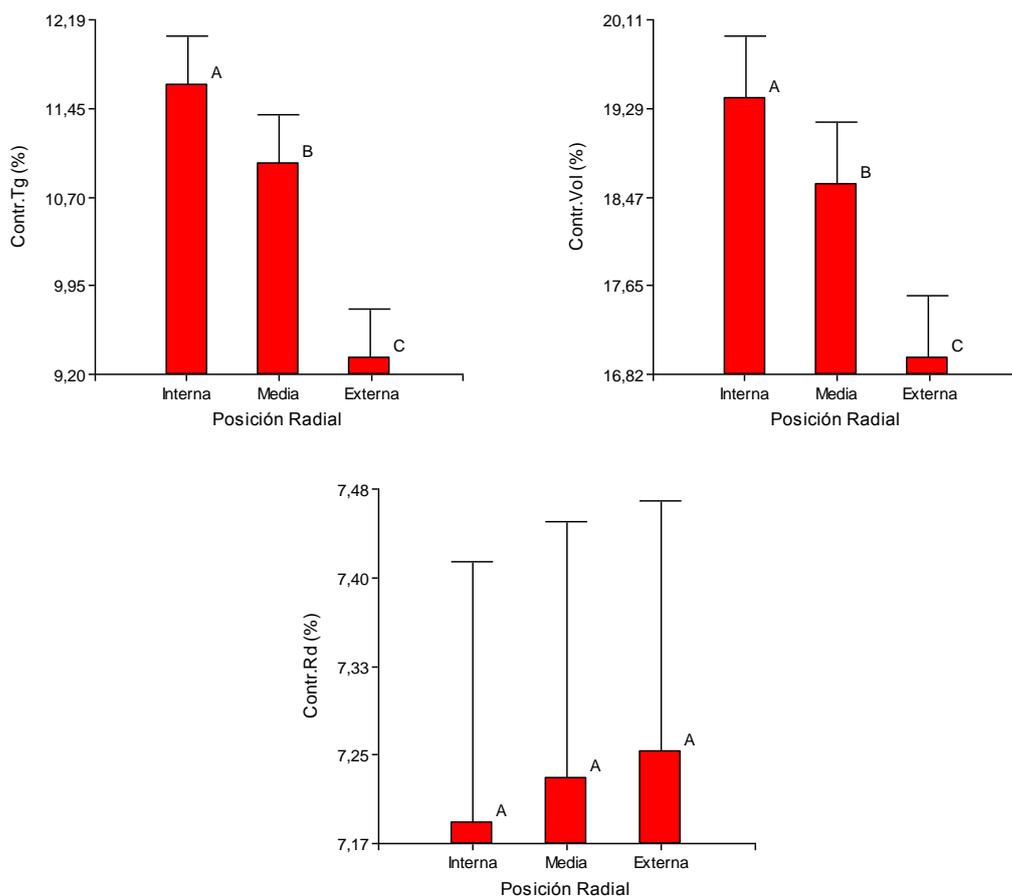


Figura 29. Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para las contracciones lineales máximas y volumétrica según posición radial médula - corteza

Los resultados obtenidos coinciden con los presentados por Lopes *et al.* (2011) quienes no encontraron diferencias significativas entre las medias de los valores de contracción en dirección radial en la madera de *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus urophylla* y *Eucalyptus grandis*. El *E. dunnii* en cambio, presentó solo diferencia estadísticamente significativa en la contracción radial para la parte más próxima a la corteza, pero no así en la contracción tangencial.

Castro (2002) en *Eucalyptus grandis*, observó diferencias significativas para las contracciones lineales máximas y para la volumétrica.

En base a esta tendencia el modelo de variación observado para las contracciones máximas en la madera de *Eucalyptus camaldulensis* demuestran un patrón inverso al descrito para la DB.

Carmo (1996) determinó que la madera de *E. grandis* presentaba una tendencia ascendente de la contracción volumétrica en dirección a la porción radial más próxima a

la corteza, con disminución en las regiones periféricas sugiriendo que podría deberse este hecho a la presencia de albura en la madera.

También en la madera de *Eucalyptus grandis* Castro (2002) detectó un patrón de variación creciente en dirección médula-corteza. Pero encontró una disminución de la contracción longitudinal, no significativa, en dirección a la corteza.

Silva y Oliveira (2003) al estudiar la contracción volumétrica y lineales máximas en madera de *E. saligna* de 16 años, encontraron valores inferiores en la región próxima a la médula con incrementos en las posiciones externas al tronco del árbol. Similar tendencia fueron encontradas por Ananías *et al.* (2009) en *Eucalyptus nitens*.

En el estudio de la contracción volumétrica en sentido radial de 7 especies de *Eucalyptus*, Oliveira *et al.* (2010) encontraron diferencias significativas en las especie *E. citriodora*, *E. tereticornis*, *E. cloeziana*, *E. urophylla* y *E. grandis*, mientras que *E. pilularis* y *E. paniculata* no presentaron diferencias estadísticamente significativas. Entre las especies con diferencias en la contracción, *E. citriodora*, *E. cloeziana* y *E. urophylla* presentaron un claro patrón de aumento de los valores de contracción en dirección a la corteza, mientras que el *E. tereticornis* presentó un patrón inverso, similar al encontrado en este trabajo.

En este sentido, Cardoso *et al.* (2013) al analizar la contracción radial y tangencial desde una posición cercana a la médula hasta una próxima a la corteza para dos alturas en la madera de *Eucalyptus tereticornis*, encontraron la misma tendencia de disminución de contracción en posición radial médula-corteza en ambas alturas.

Mantero *et al.* (2014) en *Eucalyptus bosistoana* determinaron mayores valores de contracciones en la posición más próxima a la región medular que hacia las posiciones más cercanas a la corteza.

Por lo encontrado en la literatura sería erróneo generalizar para el género *Eucalyptus* un único patrón de variación radial ya que el comportamiento de la madera de las especies mencionadas fue altamente variable.

4.1.3 Análisis y resultados de la anisotropía de la contracción

La diferencia entre la contracción tangencial y radial (coeficiente Anisotrópico), frecuentemente explica los defectos que ocurren durante el secado de la madera. Es por

ello que el factor anisotrópico es un término muy usado en la evaluación de la estabilidad dimensional de la madera.

En la Tabla 11 se presenta la valoración que según Fuentes *et al.* (2002) señala Ordoñez *et al.* (1990) como criterio para la calificación de la estabilidad dimensional. Otro criterio de clasificación muy empleado es el basado en Durlo y Marchiori (1992) y Coronel (1994) presentado en la Tabla 12. La diferencia sustancial entre una clasificación u otra se presenta en el número de categorías empleadas para clasificar las maderas, por lo que, una madera de un determinado valor pasaría a definirse de un comportamiento diferente al no haber categorías intermedias.

Tabla 11. Criterio para calificar la estabilidad dimensional de la madera en función del coeficiente de anisotropía.

Categoría	Anisotropía de la contracción
Muy estable	< 1,5
Estable	1,5 – 2,0
Moderadamente estable	2,0 – 2,5
Inestable	2,5 – 3,0
Muy inestable	> 3,0

Fuente: Fuentes *et al.* (2002)

Tabla 12. Clasificación de la estabilidad dimensional de la madera en función del coeficiente de anisotropía basada en Durlo y Marchiori (1992) y Coronel (1994).

Categoría	Relación CT/CR
Excelente	1,2 - 1,5
Normal	1,5 – 2,0
Mala o Ruin	Mas 2,0

Los valores presentados en la Tabla 5 pueden ser considerados bastante satisfactorios. Según la clasificación de Ordoñez y de Durlo y Marchiori (1992), la madera se comportaría como estable o normal. Sin embargo estos resultados se contraponen con los obtenidos en base a la Tabla 9, donde Fuentes *et al.* (2002) determina como criterio para calificar el movimiento dimensional de la madera a través de sus valores de contracciones lineales máximas radial y tangencial. Esto indica que no sería correcto evaluar la estabilidad dimensional de una madera solo en base al coeficiente de anisotropía ya que se incurriría a un error.

El valor promedio para el coeficiente anisotrópico presentado en la tabla 5 es de 1,51 similar al obtenido por Cinco y Mercado (2005) donde reportan un coeficiente de

anisotropía de 1,52. Mientras que Tinto (1991) determinó un coeficiente de anisotropía de 2,12 pese a encontrar valores considerados normales de contracciones lineales. Por su parte López (2003) para la misma especie obtuvo valores superiores a los determinados en este trabajo para el factor anisotropía (1,87) y Junior y Garcia (2004) de 1,76 para la madera de *E. urophylla* y de 1,29 a 2,48 para los límites de amplitud.

En la Figura 30 se observa que la variación del factor anisotrópico en función a la posición radial de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* presenta una tendencia a disminuir desde la porción más interna del tronco hacia la parte externa.

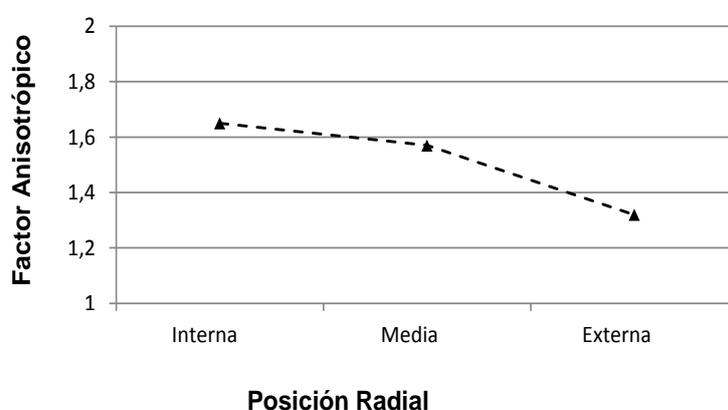


Figura 30. Variación del coeficiente anisotrópico según posición radial médula - corteza

4.1.3.1 Análisis de la variación del factor anisotrópico según orientación.

El análisis de varianza demostró en este caso también que no existen diferencias significativas de los valores medios del factor anisotrópico en relación a las orientaciones Norte y Sur de las muestras analizadas ($p=0,5235$) ANEXO 3.

La Figura 31 pone en evidencia como los valores de las posiciones externas, medias e internas son similares en ambas orientaciones para este parámetro.

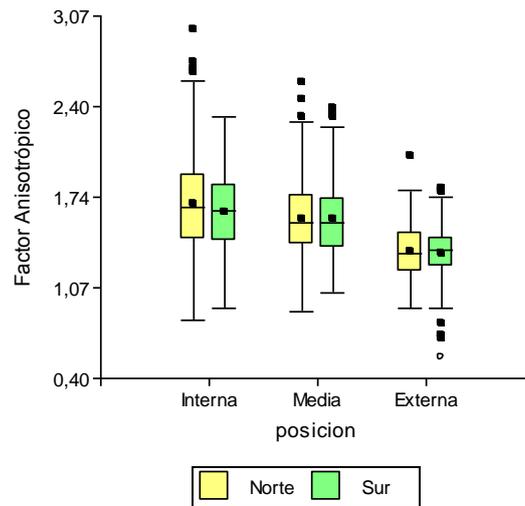


Figura 31. Gráfico de cajas para el factor anisotrópico según posición radial médula-corteza y orientación cardinal

4.1.3.2 Análisis de la variación del factor anisotrópico según posición médula-corteza.

El análisis de varianza realizado a través de modelos lineales generales y mixtos arroja que existen diferencias estadísticas altamente significativas entre las posiciones externa, media e interna ($p < 0,0001$) ANEXO 3.

En la Figura 32 se visualiza la diferencias entre sus valores medios realizados a través de la prueba de SLD Fisher ($\alpha = 0,05$), observando la tendencia del factor anisotrópico a ir disminuyendo a medida que se acerca a la regiones más próximas a la porción externa del tronco del árbol (tabla de diferencias de medias en ANEXO 3).

Quienes visualizaron esta misma tendencia del coeficiente anisotrópico en la madera de *Eucalyptus bosistoana* fue Mantero *et al.* (2014) al determinar este patrón de disminución de médula a corteza.

Oliveira y Silva (2003) observaron que en las posiciones iniciales a partir de la médula el índice fue superior al valor medio. Mientras que en las regiones más periféricas del tronco observaron valores inferiores al promedio, por lo que destacan esta tendencia de disminución del coeficiente anisotrópico de la región medular hacia la corteza y consecuentemente una madera de mayor estabilidad dimensional, en función de la menor variabilidad entre las contracciones tangenciales y radiales.

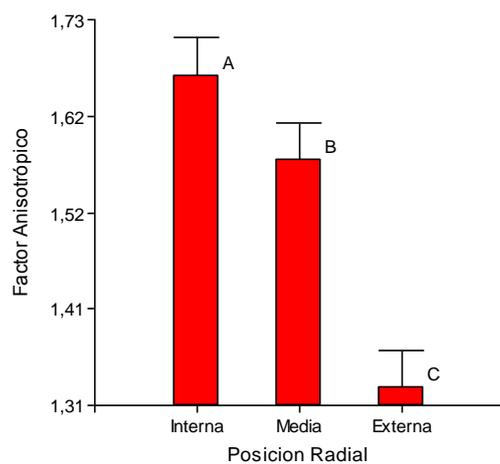


Figura 32. Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para el factor anisotrópico según posición radial médula - corteza

Sin embargo Castro (2002) a pesar de no observar diferencias estadísticamente significativas del factor anisotrópico en cuanto a variación en dirección radial al tronco, determinó que existe un patrón definido de crecimiento en dirección médula-corteza.

4.1.4 Análisis y resultados de los hinchamientos de la madera.

En la tabla 13 se presentan los resultados de los coeficientes de hinchamiento lineales máximos y volumétrico para la madera de *Eucalyptus camaldulensis* en las posiciones internas, medias y externas en posición radial médula-corteza.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula - corteza

Posición Médula-Corteza	Hinchamiento (%)	Estadísticos descriptivos				
		Media	Sd	Cv	Min	Max
Interna	Tangencial	13,28	3,25	24,44	8,33	24,89
	Radial	7,87	2,09	26,52	3,86	14,74
	Longitudinal	0,45	0,31	68,38	0	1,46
	Volumétrico	22,48	7,1	31,57	14,61	61,67
Media	Tangencial	12,56	2,46	19,57	8,91	20,29
	Radial	7,78	1,61	20,67	4,83	12,44
	Longitudinal	0,44	0,31	71,1	0	1,56
	Volumétrico	20,82	3,54	16,99	14,54	29,29
Externa	Tangencial	10,5	1,56	14,86	7,79	16,5
	Radial	7,85	1,61	20,46	3,88	13,93
	Longitudinal	0,39	0,28	73,59	0	1,38
	Volumétrico	18,73	2,77	14,77	13,67	27,64
Promedio General	Tangencial	12,06	2,75	22,76	7,79	24,89
	Radial	7,83	1,77	22,58	3,86	14,74
	Longitudinal	0,43	0,3	71,3	0	1,56
	Volumétrico	20,61	4,98	24,16	13,67	61,67

Los valores medios determinados para el hinchamiento radial máximo en la madera de *Eucalyptus camaldulensis* fue de 7,87 % para la posición interna, mientras que en las posiciones media y externa fue de 7,78 % y 7,85 % respectivamente.

En lo que respecta hinchamiento tangencial los valores obtenidos fueron de 13,28 % y 12,56 % en las posiciones interna y media y de 10,5 % para la porción más externa al tronco.

Para el hinchamiento máximo longitudinal se obtuvieron valores de 0,39 % para la posición externa, de 0,44 % en la parte media, mientras que en la porción interna del tronco fue de 0,45 %.

En cuanto al hinchamiento volumétrico total los resultados obtenidos fueron de 18,73 %; 20,82 % y de 22,48 % para las posiciones externa, media e interna respectivamente.

En la tabla 13 se observa que los valores del coeficiente de variación fueron normales a los encontrados para eucaliptus y los mismos tienden disminuir en sentido médula-corteza.

En valor promedio de la especie alcanzó niveles de 7,83 %; 12,06 %; 0,43 % y 20,61 % para el coeficiente de hinchamiento radial, tangencial, longitudinal y volumétrico respectivamente.

Se han publicado pocos datos referidos al hinchamiento para el género y en particular para esta especie, entre la bibliografía consultada Coronel (1994) reporta datos referidos al hinchamiento lineal máximo de 4,9 % para el hinchamiento radial y de 9,9 % para el tangencial, con valores de coeficiente de variación de 17,5 % y 36,6 % respectivamente para la madera de *Eucalyptus camaldulensis*, y en *Eucalyptus tereticornis* de 6,7 % para el radial y de 11,9 % para el tangencial con coeficientes de variación de 34,5 % y 30,4 % respectivamente.

También en *Eucalyptus tereticornis* Cardoso *et al.* (2013) determinaron valores medios de 7,61 %; 17,61 % y 26,62 % para el hinchamiento radial, tangencial y volumétrico respectivamente, con máximos y mínimos de 11,95 % y 4,20 % para el hinchamiento radial, de 39,31 % y 5,32 % en el tangencial y de 49,52 % y 13,95 % para el volumétrico, lo que manifiesta la gran variabilidad existente en el material empleado.

Calvo *et al.* (2006) en 5 plantaciones en la Mesopotamia Argentina de *Eucalyptus grandis* reportaron valores medios para el hinchamiento tangencial máximo que varían entre 9,8 % y 11,5 %, con coeficientes de variación comprendidos entre 13,5 % y 21,9 %, mientras que para el hinchamiento radial oscilan entre 4,5 % y 7,1 %, con coeficientes de variación entre 21,6 % y 33,2 %.

En la Figura 33 se representa la tendencia general del hinchamiento radial, tangencial y volumétrico para la especie en función de su posición radial médula-corteza. Aquí se puede observar cómo sigue el mismo comportamiento que las contracciones solamente que con valores superiores.

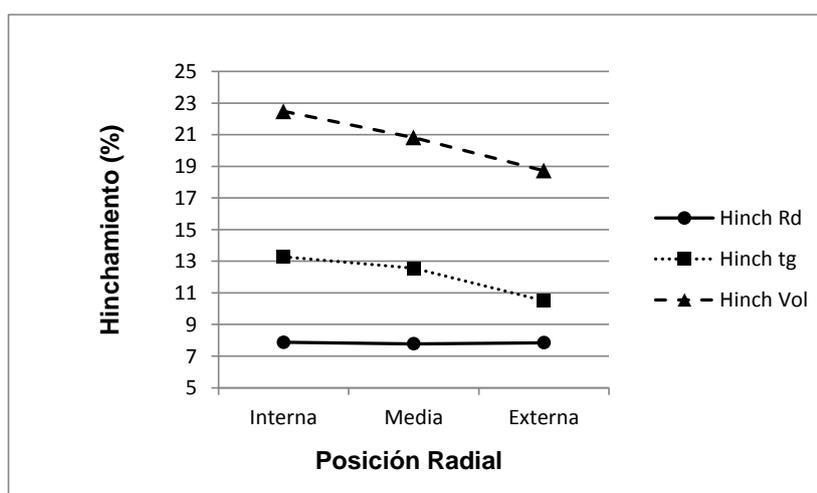


Figura 33. Variación del hinchamiento tangencial, radial y volumétrico según posición radial médula - corteza

La tabla 14, 15 y 16 presenta las medidas de resumen para los hinchamientos lineales máximos y total a nivel de Procedencias.

Al evaluar los comportamientos en cuanto a valores de hinchamiento de las diferentes procedencias genéticas se observa que el valor más bajo fue el presentado por la procedencia LL, tanto para el hinchamiento radial, tangencial como volumétrico. A su vez fue la que menor coeficiente de variación y desviación estándar mostró, lo que pone de manifiesto la mayor homogeneidad del material leñoso de esta procedencia. Por lo que a pesar de producir madera de elevados valores de propiedades de contracción e hinchamiento la variabilidad de los parámetros es relativamente bajo, lo que estará relacionado con la ocurrencia de menores defectos en la fase de secado de la madera

Tabla 14. Estadísticos descriptivos para el hinchamiento radial de la madera en función de sus procedencias

Posición	Medidas de Resumen	Procedencias									
		A	B	C	D	G	I	K	LL	M	
Hinchamiento Radial	Interna	media	8,22	8,45	7,96	7,62	9	7,99	7,29	6,38	7,39
		sd	1,72	2,42	2,26	1,42	3,32	2,76	1,02	0,67	1,81
		CV	20,88	28,6	28,34	18,58	36,84	34,5	13,96	10,46	24,46
	Media	media	7,37	8,71	7,63	7,77	8,19	7,89	7,54	6,64	6,79
		sd	1,38	1,65	1,56	1,29	2,03	1,86	1,89	0,6	0,64
		CV	18,76	18,92	20,45	16,62	24,8	23,58	25,1	8,96	9,37
	Externa	media	7,03	8,85	7,67	8,5	7,98	6,8	7,13	6,99	7,04
		sd	1,05	1,31	1,65	1,86	1,87	0,94	1,39	0,52	0,64
		CV	14,92	14,75	21,5	21,91	23,47	13,9	19,44	7,42	9,09
Promedio general	media	7,54	8,68	7,72	7,97	8,34	7,56	7,32	6,67	7,07	
	sd	1,48	1,83	1,77	1,59	2,4	2,04	1,47	0,64	1,18	
	CV	19,67	21,09	22,93	19,91	28,78	27,02	20,02	9,6	16,64	

Tabla 15. Estadísticos descriptivos para el hinchamiento tangencial de la madera en función de sus procedencias

Posición		Medidas de Resumen	Procedencias								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Hinchamiento Tangencial	Interna	media	11,15	14,77	14,45	13,89	17,29	14,46	10,76	10,37	11,19
		sd	1	3,33	1,7	2,54	5,74	3,86	0,88	0,5	0,62
		CV	8,95	22,56	11,78	18,28	33,18	26,71	8,16	4,78	5,5
	Media	media	10,7	14,59	13,5	12,82	13,88	11,43	10,72	10,07	11,09
		sd	0,83	2,59	1,74	2,19	3,02	1,55	0,7	0,69	0,89
		CV	7,72	17,72	12,92	17,11	21,77	13,52	6,5	6,82	8,01
	Externa	media	9,41	11,59	11,05	10,48	11,81	9,25	9,82	9,09	9,96
		sd	0,52	1,76	1,17	1,05	2,4	0,57	0,99	0,5	0,84
		CV	5,55	15,14	10,6	10	20,36	6,21	10,12	5,52	8,43
Promedio general	media	10,42	13,58	12,81	12,34	13,99	11,71	10,43	9,84	10,77	
	sd	1,09	2,98	2,09	2,45	4,28	3,21	0,96	0,78	0,96	
	CV	10,49	21,92	16,28	19,89	30,56	27,44	9,19	7,97	8,87	

Tabla 16. Estadísticos descriptivos para el hinchamiento volumétrico de la madera en función de sus procedencias

Posición		Medidas de Resumen	Procedencias								
			A	B	C	D	G	I	K	LL	M
Hinchamiento Volumétrica	Interna	media	19,81	23,76	22,79	21,84	27,3	22,85	29,5	17,08	19,01
		sd	1,98	4,66	3,65	2,7	9,18	6,23	18,39	0,96	1,48
		CV	9,98	19,6	16,02	12,39	33,63	27,27	62,35	5,65	7,79
	Media	media	18,47	23,71	21,62	21,16	22,5	19,85	18,73	17,1	18,37
		sd	2,03	2,99	2,87	3,19	4,7	3,29	2,45	1,05	1,21
		CV	10,97	12,59	13,26	15,08	20,87	16,59	13,08	6,15	6,58
	Externa	media	16,72	20,93	18,74	19,26	20,33	16,44	17,29	16,47	17,89
		sd	1,06	2,61	2,57	2,22	4,08	1,37	2,18	0,43	1,25
		CV	6,33	12,47	13,74	11,5	20,08	8,33	12,61	2,61	6,98
Promedio general	media	18,33	22,76	20,86	20,71	22,96	19,71	21,84	16,88	18,42	
	sd	2,15	3,72	3,39	2,93	6,56	4,86	11,96	0,9	1,38	
	CV	11,71	16,34	16,27	14,15	28,56	24,67	54,78	5,32	7,49	

Los resultados de las tablas muestran el comportamiento similar que presentó la madera de todas las procedencias en relación a las contracciones con una tendencia descendente hacia la corteza, salvo en la contracción radial donde en las procedencias B, D y LL presentaron una ligera tendencia de aumento en esa dirección. En Figura 34 se

representa el comportamiento inverso que presentan estas procedencias en el hinchamiento radial.

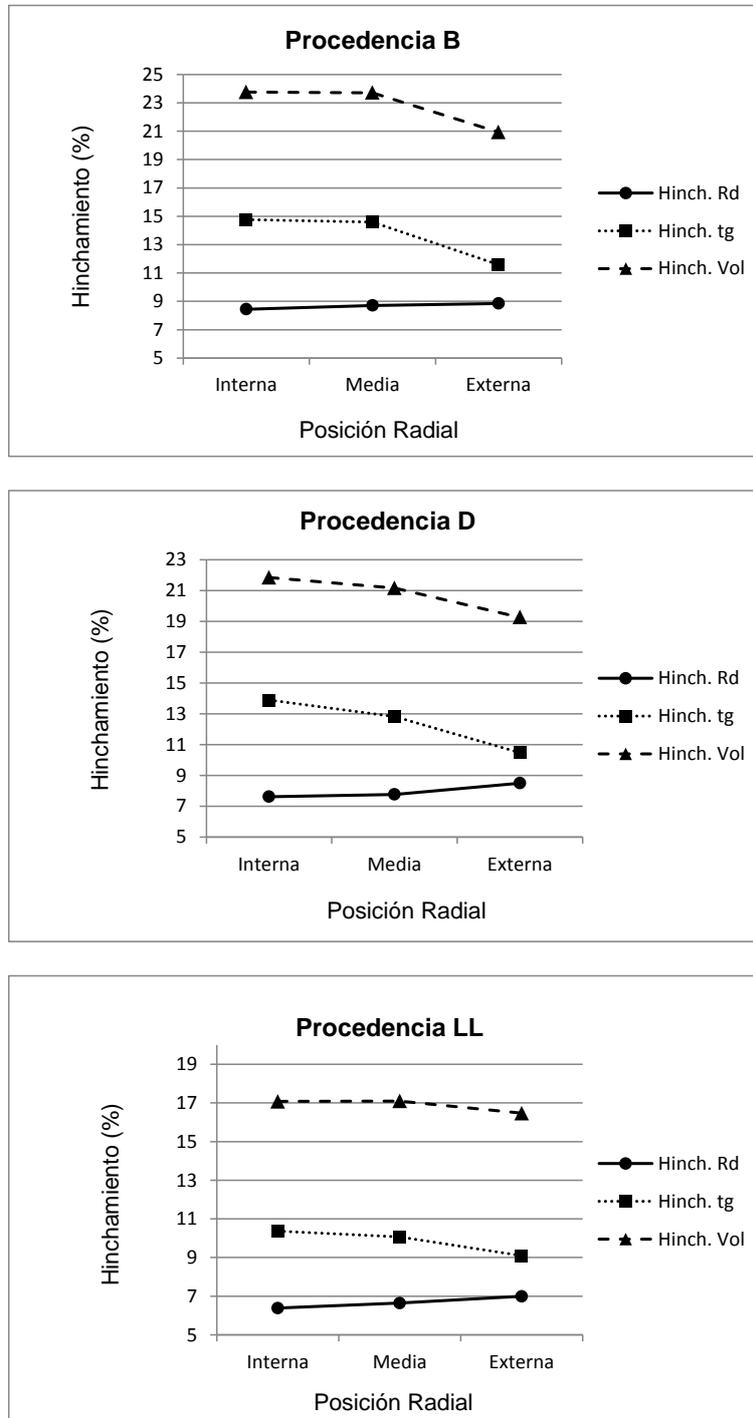


Figura 34. Hinchamientos lineales máximos y total según posición radial médula-corteza en procedencias con diferente comportamiento

Para obtener el ranking de las mejores procedencias en cuanto a sus menores valores de hinchamiento lineales máximos y total se realizó el análisis de los valores BLUP de los efectos aleatorios de las procedencias. En la tabla 17 se observa como las procedencias LL; A; M e I se encuentran por debajo del valor promedio de esta propiedad resultando ser las mejores. López (2004) en su trabajo determinó que la procedencia más promisoría para Santiago del Estero en cuanto a su desempeño en diámetro era la D (Gibb River, Kimberley, WA), sin embargo al observar el ranking elaborado en función de las propiedades físicas que influyen en la calidad de madera se evidencia como esa procedencia no presenta valores satisfactorios en las propiedades estudiadas.

Tabla 17. Coeficientes (BLUP) de los efectos aleatorios procedencias para el hinchamiento de la madera

Hinch. Rd	BLUP	Hinch. Tg.	BLUP	Hinch. Vol.	BLUP
LL	-5,40E-07	LL	-0,82	LL	-0,44
M	-3,70E-07	A	-0,76	A	-0,39
K	-2,30E-07	K	-0,6	M	-0,26
A	-2,20E-07	M	-0,47	I	-0,11
I	-1,50E-07	I	-0,11	D	0,04
C	-6,70E-08	D	0,27	C	0,14
G	1,50E-07	C	0,62	K	0,14
D	2,60E-07	G	0,8	G	0,28
B	1,20E-06	B	1,07	B	0,62

4.1.4.1 Análisis de la variación de los hinchamientos según orientación

Al igual que en el caso de la DB como en la contracción de la madera, el hinchamiento volumétrico y lineales máximos no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de posición Norte con respecto a la Sur, ($p= 0,9392$) en posición radial; ($p= 0,7168$) para la tangencial y ($p= 0,4191$) en el hinchamiento volumétrico (ANEXO 4). En Figura 35 se visualiza mejor estos resultados.

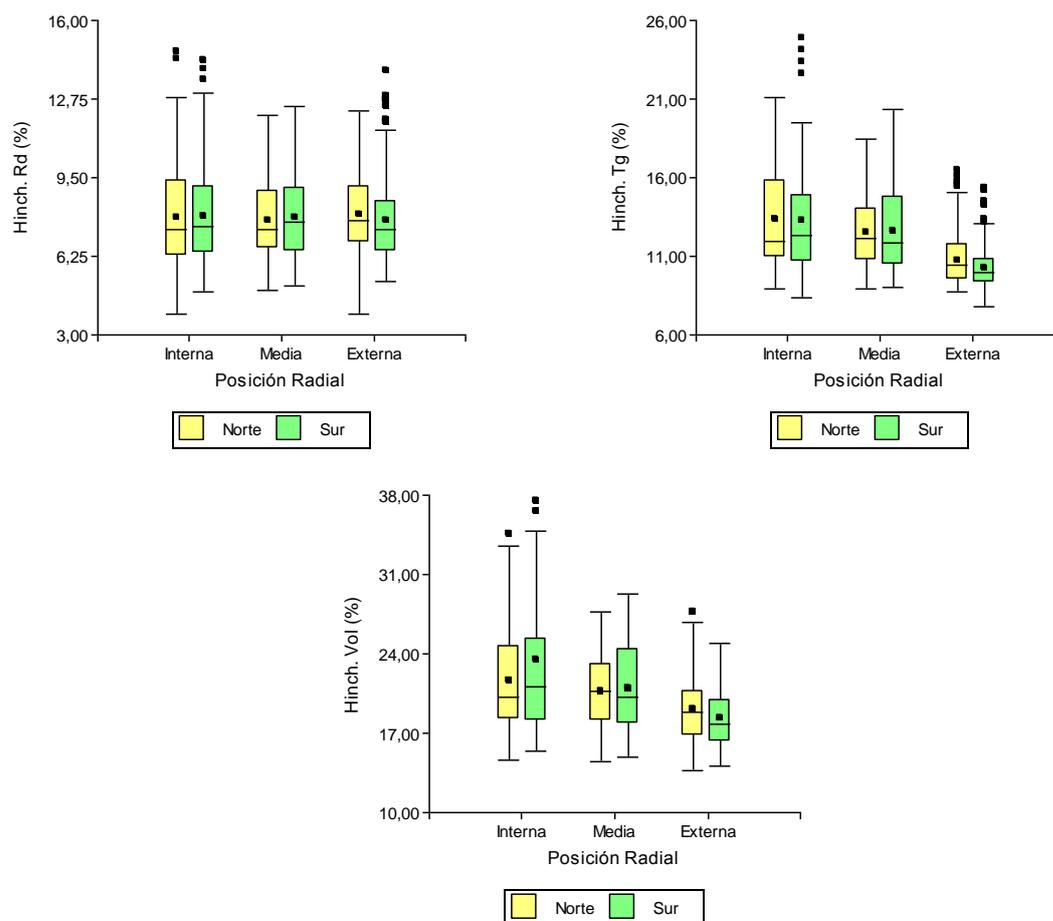


Figura 35. Gráfico de cajas para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula-corteza y orientación cardinal

4.1.4.2 Análisis de la variación de los hinchamientos según posición médula - corteza

El análisis de varianza determinó que existen diferencias significativas entre los promedios para las posiciones externa, media e interna para el hinchamiento tangencial y volumétrico ($p < 0,0001$), pero al igual que en las contracciones, no fue significativamente diferentes para el hinchamiento radial ($p = 0,9092$). La prueba de diferencia de medias presentes en la Figura 36 permite observar que no hubo variaciones en los valores de esta propiedad en sentido radial al tronco (ver tabla ANEXO 4).

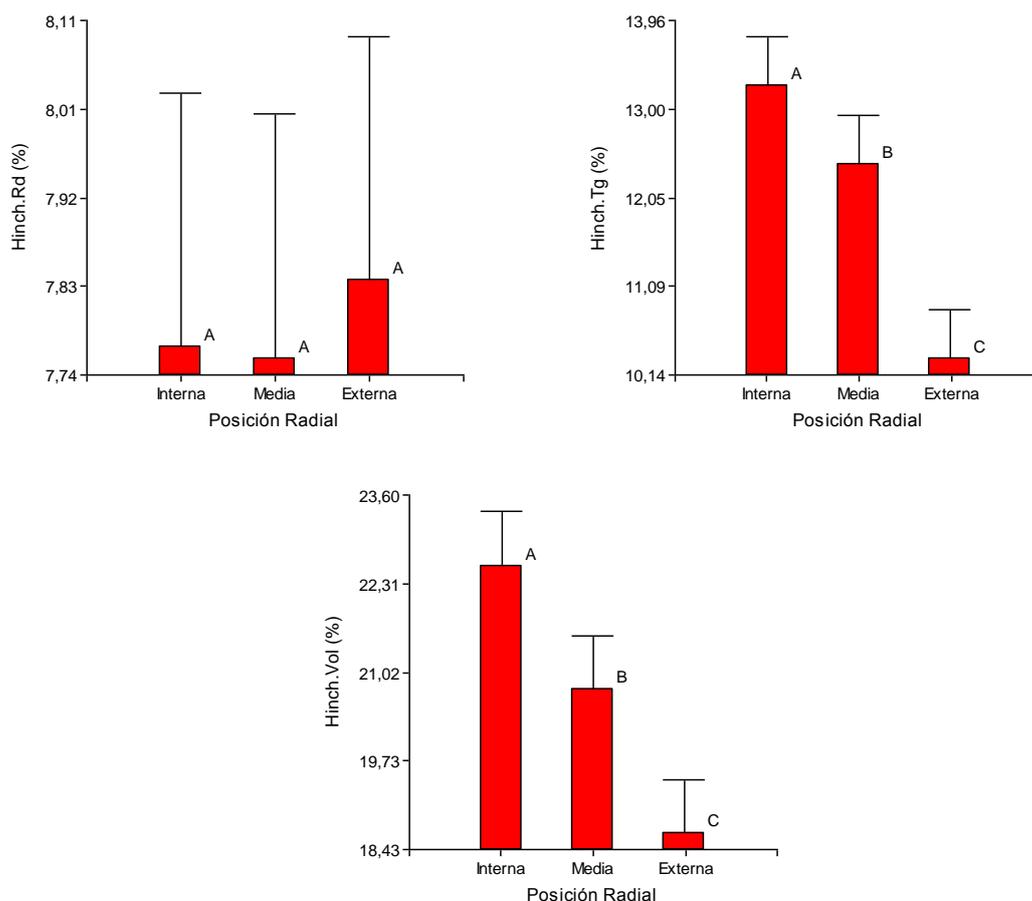


Figura 36. Prueba de hipótesis sobre diferencia de medias para los hinchamientos lineales máximos y volumétrico según posición radial médula - corteza

Si bien la tabla 13 exhiben los principales resultados para el hinchamiento volumétrico y lineales máximos en función de la ubicación de las probetas en el árbol, la variación global en función de la posición radial médula-corteza puede apreciarse mejor en la Figura 36. Aquí se demuestra como el hinchamiento tangencial y volumétrico disminuye hacia la corteza. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos por Cardoso *et al.* (2013) en *Eucalyptus tereticornis* y por Mantero *et al.* (2014) en *Eucalyptus bosistoana*. Sin embargo se contrapone con lo encontrado por Calvo *et al.* (2006), en *Eucalyptus grandis*, donde muestran que en general el hinchamiento tangencial y radial aumenta con la posición radial médula-corteza para las 5 posiciones analizadas. Los valores medios del hinchamiento tangencial encontrado por estos autores fueron de 8,4 % para la distancia de 2,5 cm, 9,3 % para 5,0 cm; 10,7 % para 7,5 cm; 12,9 % para 10,0 cm y de 13,0 % a los 12,5 cm. Mientras que para el hinchamiento radial fue de 5,8 % (2,5 cm), a 6,2 % (5 cm), a 6,8 % (7,5 cm) y hasta 7,5 % (10,0 cm) para luego disminuir a 6,6 % (12,5 cm).

Calvo *et al.* (2007) en plantaciones de *Eucaliptus grandis* en Entre Ríos y en Corrientes determinaron una tendencia similar de aumento en esta propiedad con respecto a la posición radial médula-corteza a medida que las muestras se alejan de la zona medular, a excepción del hinchamiento longitudinal donde no mostraron un patrón de variación claro.

4.1.5 Análisis y resultados de las correlaciones entre la densidad básica y las contracciones lineales máximas y volumétrica

La tabla 18 presenta los valores de correlación entre las mediciones de las contracciones lineales máximas y la volumétrica en función de la DB de la madera al 95 % de confianza.

Tabla 18. Coeficiente de correlación de Pearson para las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Variables	β Rd.	β Tg.	β Vol.	α Rd.	α Tg.	α Vol.
Densidad Básica.	-0,03 (p=0,5119)	-0,38 (p<0,0001)	-0,38 (p <0,0001)	-0,03 (p=0,4701)	-0,37 (p<0,0001)	-0,37 (p<0,0001)

En la tabla 18 se observa como la DB presentó una correlación baja y negativa tanto con la contracción como el hinchamiento cuyo coeficiente de Pearson mayor fue de $r = -0,38$ para la contracción tangencial como volumétrica. Estos resultados son similares a los encontrados por Junior y Garcia (2004) al estudiar la madera de *Eucalyptus urophylla* y por González *et al* (2018) al evaluar la relación del espesor de los anillos de crecimiento con respecto a las propiedades físicas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, donde tampoco encontraron correlación de la DB con las contracciones ni con el índice de contracción anisotrópico.

Sin embargo Potulski (2010) en *Pinus maximinoi* y *Pinus taeda* determinó que si existe una correlación entre la DB y la contracción volumétrica, en *Pinus taeda* encontró una positiva y alta correlación ($R= 0,7931$) y menores coeficientes para la primera especie, demostrando que existe un alto grado de interacción entre las propiedades estudiadas.

Doldán (2003) al estudiar la madera de *Eucalyptus grandis* obtuvo valores de coeficiente de correlación de 0,575 para la contracción tangencial, 0,654 para la radial y de 0,728 para la volumétrica. Concluyendo que a mayor DB, mayor será la contracción tangencial, radial y consecuentemente la volumétrica.

En la Figura 37 se observa la correlación que presentó la DB en función de la contracción tangencial de similar valor a la volumétrica.

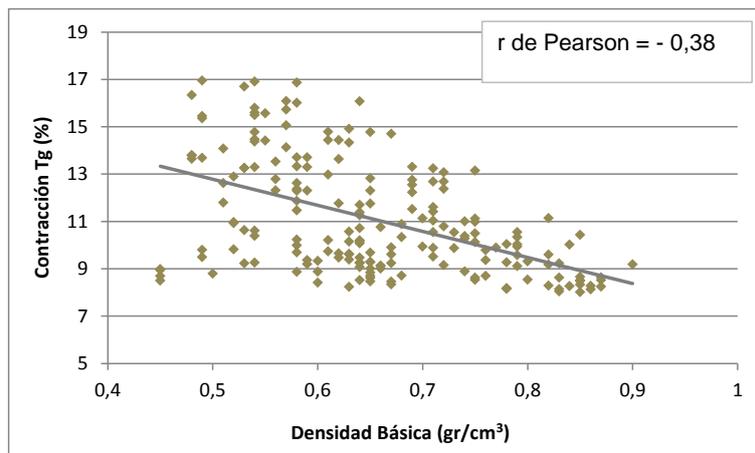


Figura 37. Gráfico de correlación de la densidad básica en función de la contracción tangencial

La tabla 18 y Figura 37 indican que la DB no sería una buena variable regresora para estimar tanto las contracciones como el hinchamiento de la madera, por lo que demuestra que esta propiedad no permite prever el comportamiento dimensional de una madera para un determinado uso final.

Como el objetivo del presente estudio fue evaluar la capacidad predictiva de la técnica de NIRS en la determinación de las propiedades físicas estudiadas. En ese contexto se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los espectros.

4.2 Análisis y resultados de los espectros NIR

4.2.1 Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

Para la medición de los espectros se utilizaron las caras tangenciales y radiales de las muestras, ya que aún hoy no están bien establecidas las diferencias en las informaciones espectrales obtenidas en las distintas caras. La cara transversal fue mayormente utilizada para colocar la denominación de la muestra y por lo tanto no fue empleada en la medición, debido a que la tinta podría influir en la composición de los espectros medidos.

Diversos investigadores evaluaron el comportamiento de la información recogida en las distintas caras, Hein *et al.* (2009) encontraron al estudiar la densidad básica de árboles de *E. urophilla* que los modelos con estadísticos más altos se producían cuando los espectros eran obtenidos en las caras radiales y transversales.

Rosso (2010) determinó que los mejores modelos de predicción también de densidad básica en madera de *Eucalyptus grandis* se obtuvieron con la adquisición de espectros en la cara radial.

La influencia de las caras en la adquisición de la información espectral no solo influye en predicciones de densidad básica, sino también en las propiedades mecánicas de la madera. Así Andrade (2009) al evaluar clones de *Eucalyptus* verificó que las caras radiales y transversales proporcionaban los modelos con mejor desempeño. En cambio, en el estudio de las propiedades de carbón las estadísticas asociadas a los mejores modelos fueron las obtenidas en la cara radial y tangencial.

Ribeiro (2009) encontró en las maderas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y *Eucalyptus grandis* que la cara tangencial es la que mejor predice las propiedades físicas (densidad básica y contracción volumétrica) y mecánicas (MOE y MOR).

En este estudio se promediaron los espectros obtenidos de la DB de las caras radiales y tangenciales. Esta forma de proceder arrojó modelos con valores de estadísticos similares o en algunos casos mejores a los encontrados en la bibliografía, que si se hubieran tomado individualmente por cada una de las caras.

4.2.1.1. Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la densidad básica.

En la Tabla 19 se presentan las estadísticas asociadas a las ecuaciones de calibración obtenidas para predecir la densidad básica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh a partir de los espectros originales con diferentes rutinas y después de usar el tratamiento espectral de la primer derivada.

Tabla 19. Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos para la densidad básica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Modelo	Trat	Rutina	outlier	VL	R ² c	RMSEC	R ² cv	R ² p	RMSECV	RMSEP	RPD
1	no	1	-	5	0,76	0,041	0,76		0,041		2,05
2	no	2	5	5	0,78	0,040	0,77		0,041		2,10
3	no	3	5	8	0,82	0,036	0,81		0,036		2,31
4	no	4	6	10	0,83	0,035		0,83		0,035	2,43
5	1d	1	-	8	0,84	0,034	0,83		0,035		2,39
6	1d	2	4	8	0,85	0,032	0,84		0,034		2,50
7	1d	3	4	7	0,85	0,032	0,84		0,034		2,50
8	1d	4	4	9	0,87	0,031		0,84		0,032	2,63

Nota: 1d - primera derivada; Outlier - número de muestras descartadas; VL - número de variables latentes; R²c – Coeficiente de Determinación de la Calibración; RMSEC – Error cuadrático medio de Calibración; R²cv – Coeficiente de Determinación de la Validación Cruzada; R²p – Coeficiente de Determinación de Predicción; RMSECV – Error cuadrático medio de Validación Cruzada; RMSEP - Error cuadrático medio de Predicción; RPD – Relación de Desempeño de los Desvíos.

Los resultados obtenidos en la Tabla 19 muestran que las estadísticas asociadas a los modelos predictivos presentaron coeficientes de determinación con un rango de variación de 0,76 a 0,87 para el lote de calibración y de 0,76 a 0,84 para el de validación, mientras que los valores de RPD variaron de 2,05 a 2,63. Los estadísticos determinados muestran que la aplicación del tratamiento matemático de la primera derivada mejoró el desempeño de los modelos desarrollados a excepción de la rutina 1 cuyo valor de RPD fue inferior a 2,5. Estos modelos son a su vez los que presentan menores valores de errores de predicción variando entre 0,035 a 0,032 g/cm³.

Similares estadísticos fueron encontrados por Hein *et al.* (2009) al estudiar la densidad básica en árboles de 14 años de edad de *Eucalyptus urophylla* donde las calibraciones que proveían buenos coeficientes de determinación de predicción con variación de 0,78 a 0,83 y valores de RPD de 2,2 a 2,5 en la cara radial y transversal.

Mientras que los estadísticos obtenidos para la superficie espectral tangencial fueron menores (R^2_{cv} de 0,63 a 0,67 y RPD de 1,6 a 1,7). Costa *et al.* (2018) encontraron estadísticos similares a los obtenidos en este trabajo al evaluar como influyen en la capacidad predictiva de los modelos: la adquisición espectral, la superficie de la madera y la calidad de la superficie (rugosidad). Se observaron los mejores resultados con modelos obtenidos en superficie transversal de las muestras, mecanizada por medio de sierra de cinta y utilizando esfera integradora ($R^2_p = 0,87$, RMSEP = 23 kg/m⁻³ y RPD = 3,0), así como para el fibra óptica ($R^2_p = 0,78$, RMSEP = 35 kg/m⁻³ y RPD = 2,1).

Sin embargo los estadísticos obtenidos en este trabajo (Tabla 19) resultaron superiores a los valores hallados por Ribeiro (2009) en su estudio de densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Pinus caribaea* mediante NIRS, al observar que las mejores predicciones presentaban un valor de R^2 de 0,64 para la calibración y 0,50 para la validación cruzada en eucaliptos, a excepción en pino que obtuvo R^2 de 0,95 para calibración y 0,75 para validación.

Carneiro (2008) al desarrollar los modelos de calibración para predecir la densidad básica en láminas de madera de *Pinus* sp. determinó que el modelo de mayor robustez fue el desarrollado a partir de la selección de fajas espectrales alcanzando valores de R^2 de 0,83 y 0,81 para calibración y validación respectivamente, mientras que los valores alcanzados para el SEP y RPD fue de 0,0492 g/cm³ y 1,72 respectivamente.

Viana (2008) al estudiar la predicción de la densidad básica a la altura del Dap en seis clones de *Eucalyptus* obtuvo valores de R^2 que variaron de 0,62 a 0,98 para la calibración y de 0,10 a 0,79 para la validación. Los valores de RPD asociados a los modelos resultaron relativamente bajos para esta propiedad en comparación con los demás autores, a excepción de dos clones cuyos valores fueron de 2,3 y 4,3 respectivamente

Rosso (2010) al determinar modelos de predicción para densidad básica en madera de *Eucalyptus grandis* de 27 años obtuvo un valor máximo de R^2 de 0,78 para calibración y 0,74 para validación y valores de RPD de 2,29.

Milagres *et al.* (2013) al estudiar la influencia de la edad en la generación de modelos de predicción de la densidad en la madera de *Eucalyptus* ssp. con edades de 3 a 7 años, desarrollaron modelos con valores de R^2_{cv} que variaron de 0,76 a 0,83 y valores de RPD de 2,04 a 2,41.

La calibración con mejor desempeño para predecir la densidad básica presentada en la Tabla 19 fue la ajustada con los espectros tratados mediante primera derivada y a partir de validación independiente (modelo 8). La calidad de este modelo se demuestra por los altos valores de R^2 obtenidos en calibración y validación de 0,87 y 0,84 respectivamente, el mayor valor de RPD alcanzado de 2,63 y los menores valores de RMSEC (0,031) y RMSEP (0,032) con solo 2 términos PLS mas (V.L=9) en comparación al modelo 7 tratado mediante derivada con eliminación de outliers y selección de variables.

Varios autores encontraron también que los modelos más robustos se obtenían con este pretratamiento. Así, Zumaeta *et al.* (2009) encontraron que el tratamiento matemático de la primera derivada fue el que producía el modelo más robusto para la predicción de esta propiedad al estudiar la madera de clones de *Eucalyptus* de 3 años de edad, con los valores más altos de R^2_{cv} (0,91) de RPD (2,6) y el menor error estándar de validación cruzada de 0,013 g/cm³.

En este mismo sentido Jones *et al.* (2005) al evaluar la densidad seca al aire de *Pinus taeda* obtuvo modelos con valores de R^2_p que variaron dependiendo del pretratamiento espectral utilizado de 0,82 a 0,83 con valores de RPD de 0,88 a 2,28 del cual el mejor modelo fue en el que utilizaron la primera derivada.

Hein *et al.* (2010) aplicando este pretratamiento redujo el error estándar de predicción (SECV) de 0,0323 a 0,0298 g/cm³ y aumentó el valor de RPD de 1,98 a 2,15 y el R^2_{cv} de 0,74 a 0,78.

Gouvêa *et al.* (2011), al tratar los espectros mediante la primera derivada y con 10 variables latentes, desarrollaron un modelo de predicción de densidad básica con madera molida de diferentes clones de *Eucalyptus*, arrojando un valor de coeficiente de determinación de validación de 0,84 y valores de error estándar de calibración y predicción de 0,013 y 0,017 g/cm³ respectivamente.

Andrade (2009) también observó que la aplicación de pre-tratamientos espectrales proporcionó modelos de calibración con mayor precisión que los no tratados, presentando de manera general, los mejores resultados en las propiedades mecánicas estudiadas tanto en muestras de madera maciza como molida de clones de *Eucalyptus*. Pero no siempre el uso de estos tratamientos matemáticos mejoran la calidad del modelo, este mismo autor al evaluar las propiedades del carbón como tenor de carbono fijado, tenores de materiales volátiles y rendimiento gravimétrico de la carbonización, verificó que el empleo de tratamientos espectrales no contribuyó al mejoramiento de los modelos de

calibración desarrollados, sino que al contrario los modelos con mejor desempeño se obtuvieron con los datos espectrales originales tanto para el carbón sólido como molido.

Nisgoski (2005) al analizar la predicción de la densidad básica mediante la técnica PLS también observó que los mejores resultados de calibración fueron obtenidos con los datos originales (sin transformación) con valores de R^2 de 0,76 para la calibración y de R^2 de 0,61 para la validación del modelo mediante validación cruzada y de R^2_p 0,18 para validación independiente.

Hein *et al.* (2009) al estudiar la densidad de *Eucalyptus urophilla* observaron que en la sección radial se producían las mejores ecuaciones y que el pre-tratamiento de la primer derivada era el que proporcionaba el modelo más robusto, sin embargo en la sección transversal los pre-tratamientos espectrales no mejoraron las estadísticas asociadas a los modelos predictivos, produciendo no solo aumentos en el número de V.L. sino también en el número de outliers.

En la Figura 38 se muestra la fuerte asociación existente entre los valores medidos por el método convencional y los valores predichos por el modelo.

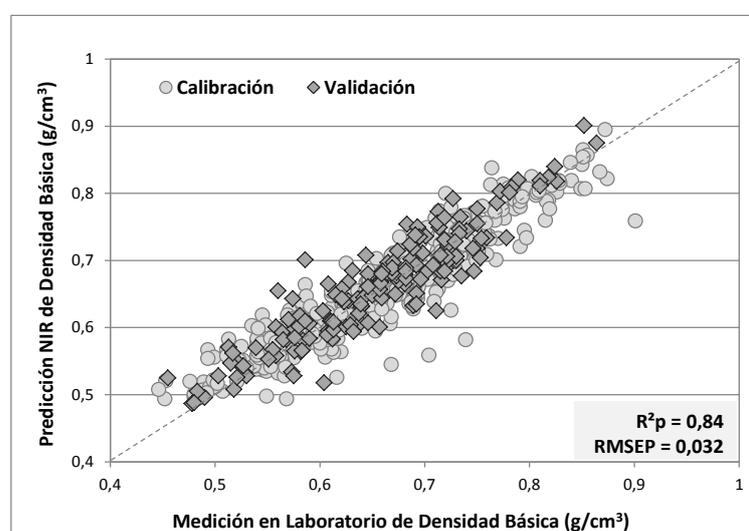


Figura 38. Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para la densidad Básica

Este ajuste lineal indica que la densidad básica media de la madera es una característica que puede ser evaluada por medio de la técnica NIRS, posibilitando una adecuada predicción con muy buena precisión en estudios de mejoramiento forestal.

4.2.1.2 Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la contracción en la cara tangencial.

En la tabla 20 se presentan las estadísticas asociadas a las ecuaciones de calibración obtenidas a partir de la información espectral de la cara tangencial de las muestras para predecir la contracción de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. De la misma forma que para la densidad básica de la madera, las calibraciones fueron adquiridas a partir de los espectros originales y después de usar el tratamiento espectral de la primera derivada con diferentes rutinas.

Tabla 20. Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara tangencial para la contracción de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Modelo	Trat	Rutina	outlier	VL	R ² c	RMSEC	R ² cv	R ² p	RMSECV	RMSEP	RPD
1	no	1	-	12	0,61	1,350	0,60		1,386		1,58
2	no	2	3	12	0,62	1,333	0,60		1,373		1,59
3	no	3	3	12	0,63	1,320	0,61		1,354		1,62
4	no	4	3	12	0,62	1,352		0,64		1,209	1,80
5	1d	1	-	12	0,73	1,127	0,70		1,198		1,83
6	1d	2	2	12	0,74	1,109	0,70		1,180		1,85
7	1d	3	2	12	0,74	1,109	0,71		1,157		1,89
8	1d	4	2	9	0,71	1,179		0,70		1,112	1,95

Las estadísticas asociadas obtenidas para los modelos de calibración y predicción presentadas en la Tabla 20 reflejan como varió el coeficiente de determinación de calibración de 0,61 a 0,74, mientras que para el lote de validación los valores de R²cv y R²p estuvieron comprendidos entre 0,60 a 0,71. Los valores de RMSEC variaron de 1,352 a 1,109 mientras que los de RMSECV y RMSEP en la validación de los modelos estuvieron entre 1,386 y 1,112. En cuanto al parámetro de relación de desempeño de desvío se obtuvo para los modelos desarrollados valores comprendidos entre 1,58 y 1,95 respectivamente.

Si comparamos los modelos desarrollados con los mejores estadísticos entre los espectros tratados con pre-tratamiento espectral y los no tratados, se puede observar que al igual que en el caso de la densidad básica de la madera, el empleo del tratamiento espectral de la primera derivada mejoró los estadísticos empleados en la selección del modelo produciendo un aumento no solo en los valores del coeficiente de determinación

de 0,63 a 0,74 en la calibración y de 0,64 a 0,71 en la validación, sino también en los valores de RPD de 1,80 a 1,95 y con una disminución a su vez del error estándar de validación de 1,209 a 1,112.

En la Tabla 20 se observa como en el modelo 4 el valor de R^2 en validación es ligeramente mayor al de calibración, este resultado es normal y también observado por otros autores. Esto se debe a que la elección de las muestras generalmente es aleatoria y las muestras de mayor error experimental en la medición del dato de contracción quedaron dentro del lote de calibración. La correlación entre valores medidos y validados es mayor porque el error de laboratorio asociado a los datos de validación fue relativamente menor.

4.2.1.3 Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción de la contracción en la cara radial

En la Tabla 21 se presentan las calibración obtenidas a partir de la información espectral de la cara radial de las muestras para predecir la contracción de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

Tabla 21. Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara radial para la contracción de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Modelo	Trat	Rutina	outlier	VL	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	R^2_p	RMSECV	RMSEP	RPD
1	no	1	-	12	0,40	1,138	0,37		1,168		1,29
2	no	2	3	12	0,43	1,087	0,39		1,122		1,35
3	no	3	3	12	0,44	1,077	0,41		1,109		1,36
4	no	4	6	9	0,40	1,108		0,38		1,138	1,29
5	1d	1	-	12	0,52	1,016	0,44		1,104		1,37
6	1d	2	3	12	0,54	0,992	0,46		1,077		1,40
7	1d	3	3	10	0,52	1,016	0,48		1,058		1,43
8	1d	4	3	12	0,56	0,988		0,49		1,005	1,47

En este caso, a pesar de que el número de variables latentes y outliers se mantuvieron similares a los modelos desarrollados a partir de la información obtenida en las caras tangenciales, las demás estadísticas asociadas disminuyeron sustancialmente a

excepción del error cuadrático medio tanto de calibración como de validación que presentó mejores resultados que las ecuaciones obtenidas en la cara radial (RMSEC de 1,138 a 0,988; RMSECV y RMSEP de 1,168 a 1,005). Los valores de R^2 para el lote de calibración variaron de 0,40 a 0,56 mientras que para el lote de validación fue de 0,37 a 0,48 y los valores de RPD variaron de 1,29 a 1,47.

De esta forma es posible observar que los modelos de mayor robustez para el caso de contracción de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh son los obtenidos a través de la información espectral adquirida de la cara tangencial de las muestras de madera. El modelo que proporcionó el mejor ajuste fue el número 8 presentado en la Tabla 20. En este modelo los espectros fueron tratados mediante el pre-tratamiento espectral de la primera derivada y a partir de validación independiente, demostrando la calidad del modelo empleado al presentar el menor número de outliers (2), así como el de variables latentes (9) y mayor valor de RPD de 1,95. Si bien el valor de R^2 de calibración y validación son ligeramente inferiores al modelo 6 y 7 los demás parámetros le dan mayor peso y robustez al modelo seleccionado.

Las estadísticas presentadas en la Tabla 20 para la predicción de la contracción de la madera fueron ligeramente inferiores a las mostradas en otros estudios realizados para la evaluación del mismo parámetro.

Kokutse *et al.* (2010) al estudiar las contracciones en la madera de teca, encontraron que todos los modelos desarrollados para predecir tanto contracciones radiales como tangenciales fueron altamente significativos cuando los espectros eran adquiridos tanto en cara radial como tangencial/radial de las muestra. Aunque los modelos con mejores estadísticas fueron los presentados para la contracción tangencial obtenida con los espectros adquiridos en la superficie tangencial/radial. Los coeficientes de determinación en la calibración para la cara tangencial/radial variaron en la contracción radial y tangencial de 0,86 a 0,88 respectivamente, mientras que el coeficiente de determinación de predicción fue de 0,72 a 0,83 para ambos casos y los valores de RPD de 1,8 para la contracción radial a 2,4 para la tangencial. Otra conclusión a la que arribaron estos autores era que estos estadísticos resultaron menores cuando se convirtieron las probetas en madera molida.

Ribeiro (2009) al analizar la contracción volumétrica mediante NIRS, observó que en la madera de *Eucalyptus* el modelo podía ser validado tanto para la cara tangencial como la radial. Mientras que en la madera de *Pinus* apenas en la cara tangencial se conseguía validar el modelo. Para la madera de *Eucalyptus* el R^2 para la calibración fue de 0,83 en

la cara tangencial, mientras que el R^2_{cv} fue de 0,37. Pero aplicando el modelo de validación independiente obtuvo un R^2_p de 0,55. De la misma manera en la cara radial, para la calibración obtuvo un R^2 de 0,74 y 0,47 para la validación cruzada. Sin embargo con la validación independiente el R^2 alcanzó valores de 0,72 obteniendo de esta forma un menor coeficiente de determinación para la calibración del modelo, aunque al validar el modelo con muestras externas (validación independiente) el R^2 fue mayor.

Las estadísticas asociadas al modelo para contracción tangencial, radial y longitudinal encontrados por Bailléres *et al.* (2002) en un programa de mejoramiento de eucaliptos fue de R^2 de 0,82; 0,65 y 0,35 respectivamente mientras que el RDP fue de 2,33 para el modelo de contracción tangencial, de 1 para el radial y 0,67 para el longitudinal, indicando que la técnica NIRS es aceptable para usar como herramienta de detección rápida para la contracción tangencial, pero no en contracción radial y longitudinal donde los parámetros estadísticos no fueron buenos.

Taylor *et al.* (2008) al estudiar la posibilidad de predicción de la contracción volumétrica total en madera de caoba mediante técnica NIRS, observaron que el uso de datos del espectro NIR completo (500 a 2500 nm) proporcionó mejores valores de los parámetros utilizados en la evaluación de ecuaciones de predicción para esta propiedad (R^2_p de 0,67 y RMSEP de 0,006), mientras que las calibraciones obtenidas con datos de un rango limitado del espectro NIR (500 a 1000 nm) proporcionó un menor desempeño (R^2_p de 0,23 y un RMSEP de 0,009).

Sin embargo Hein (2008) al evaluar la madera de *Eucalyptus urophylla* encontró que la contracción de la madera no presentó correlación con los espectros NIR.

Los parámetros estadísticos encontrados para el modelo seleccionado en la Tabla 20 son representados en la Figura 39 donde se observa la asociación existente entre los valores obtenidos por el método de determinación convencional de esta propiedad y los valores predichos por el modelo predictivo.

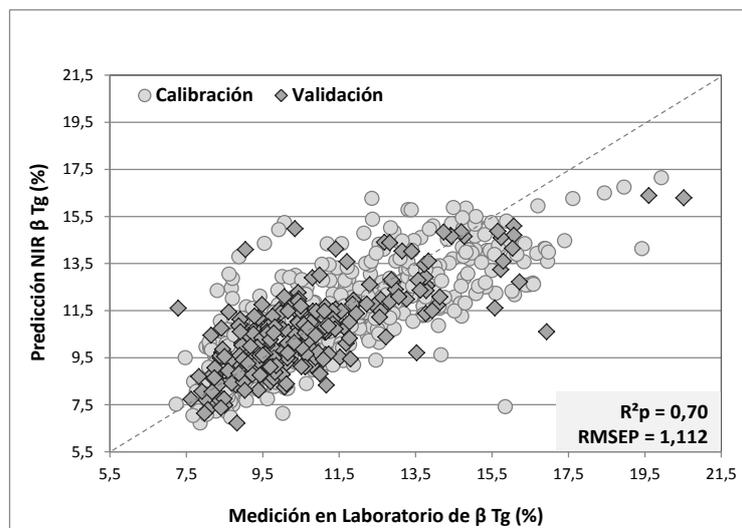


Figura 39. Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para la contracción en cara tangencial.

Los resultados de los parámetros estadísticos del modelo 8 para la contracción de la madera indican que son satisfactorios para realizar predicciones preliminares como lo establece Schimleck *et al.* (2003), permitiendo de esta forma ser usado como una herramienta útil en etapas iniciales de mejoramiento. Los resultados obtenidos son importantes y valiosos si se tiene en cuenta que la estabilidad dimensional es una propiedad que presenta gran variabilidad al momento de realizar su determinación de manera convencional, por lo que estas calibraciones son muy útiles al momento de predecir esta propiedad.

4.2.1.4 Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción del hinchamiento en la cara tangencial.

La Tabla 22 presenta los valores de los estadísticos obtenidos en la modelación de las ecuaciones de calibración a partir de la información espectral adquirida de la cara tangencial de las muestras para predecir el hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Para la obtención de las ecuaciones se siguieron las rutinas establecidas similares a las de los parámetros anteriores.

Tabla 22. Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara tangencial para el hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Modelo	Trat	Rutina	outlier	VL	R ² c	RMSEC	R ² cv	R ² p	RMSECV	RMSEP	RPD
1	no	1	-	12	0,61	1,768	0,58		1,820		1,56
2	no	2	4	12	0,62	1,734	0,60		1,779		1,59
3	no	3	4	12	0,62	1,724	0,60		1,769		1,60
4	no	4	4	11	0,60	1,724		0,62		1,846	1,54
5	1d	1	-	10	0,71	1,528	0,65		1,680		1,69
6	1d	2	4	11	0,74	1,437	0,67		1,598		1,77
7	1d	3	4	9	0,73	1,456	0,70		1,536		1,85
8	1d	4	3	9	0,74	1,390		0,67		1,673	1,69

Los resultados expuestos en la Tabla 22 muestran que las estadísticas asociadas a los modelos predictivos presentaron variaciones comprendidas entre 0,60 a 0,74 para el coeficiente de determinación del grupo de calibración y entre 0,58 a 0,70 para la validación de los modelos mediante validación cruzada e independiente. Los valores de RPD estuvieron entre 1,56 y 1,85 y los errores de validación entre 1,846 y 1,536. Se observa que al igual que en las propiedades evaluadas anteriormente, como el tratamiento espectral contribuyó al mejoramiento del desempeño de los modelos de calibración desarrollados. Se mejoraron las estadísticas de cada ecuación, lo que significó aumentos en los valores de R² tanto en la calibración como en la validación, de los valores de RPD y con disminución no solo en los valores de RMSEC y RMSEV, sino también del número de variables latentes de cada modelo.

4.2.1.5 Análisis de los modelos de calibración y validación en la predicción del hinchamiento en la cara radial

La Tabla 23 muestra los estadísticos determinados en la modelación de las ecuaciones de calibración a partir de la información espectral adquirida de la cara radial de las muestras para predecir el hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

Tabla 23. Parámetros estadísticos para calibraciones y validaciones NIRS de los modelos obtenidos en cara radial para el hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Modelo	Trat	Rutina	outlier	VL	R ² c	RMSEC	R ² cv	R ² p	RMSECV	RMSEP	RPD
1	no	1	-	12	0,40	1,342	0,36		1,384		1,28
2	no	2	3	12	0,42	1,306	0,39		1,340		1,32
3	no	3	3	11	0,42	1,303	0,39		1,337		1,33
4	no	4	3	12	0,43	1,283		0,42		1,336	1,33
5	1d	1	-	10	0,40	1,342	0,35		1,389		1,28
6	1d	2	3	11	0,42	1,306	0,38		1,351		1,31
7	1d	3	3	9	0,44	1,280	0,40		1,325		1,34
8	1d	4	3	10	0,40	1,342		0,40		1,266	1,40

Al analizar las ecuaciones desarrolladas en la Tabla 23 se observa que al igual que para la contracción de la madera los valores de los estadísticos son menores que los obtenidos para la cara tangencial. Mostrándose en este caso como el pre-tratamiento espectral de la primera derivada no manifestó mejoría en los parámetros evaluados con respecto a los modelos desarrollados con los espectros originales. Se obtuvieron valores bajos tanto del coeficiente de determinación en calibración (0,40 a 0,44) como en validación (de 0,35 a 0,42) y con valores de RPD que no superan 1,40.

En base a los resultados obtenidos es posible afirmar que los mejores modelos desarrollados para la predicción del hinchamiento se consiguieron a través de los espectros adquiridos en la cara tangencial. De los cuales, el de mayor precisión fue el ajustado a partir de los espectros tratados por medio de la primera derivada y con la aplicación de la rutina 3 (eliminación de outliers y selección de longitudes de onda por la prueba de incertidumbre de Martens) alcanzando valores de R²cv= 0,70; RMSECV= 1,536 y RPD= 1,85.

Los valores de RPD asociados a los modelos resultaron relativamente más bajos para esta propiedad en comparación con el de contracción de la madera, a excepción del modelo 7 presente en la Tabla 22 que fue bastante similar.

En la Figura 40 se presenta el gráfico de los valores de hinchamiento obtenido por el método convencional y por los valores predichos por el modelo predictivo con mejores estadísticas (R²cv= 0,70; RPD= 1,85) de la Tabla 22 (modelo 7).

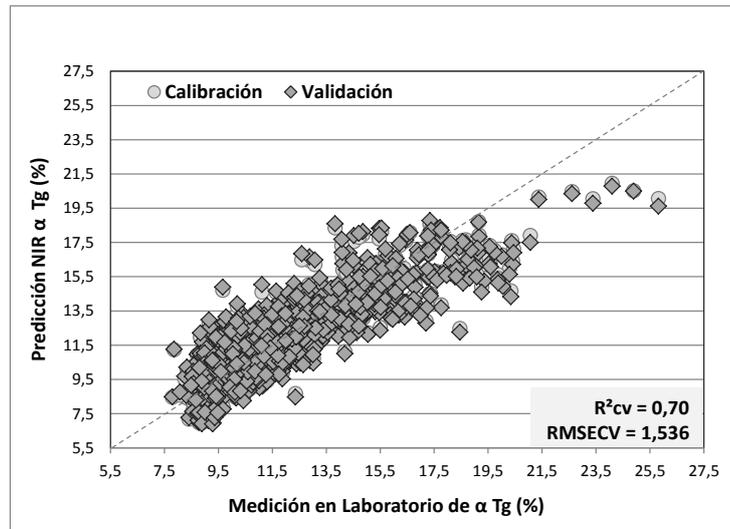


Figura 40. Gráfico de predicción que relaciona los valores medidos y los valores predichos del modelo más robusto para el hinchamiento en cara tangencial.

Estos estadísticos encontrados (R^2_{cv} , RPD) indican de esta forma que el hinchamiento de la madera es una característica que puede ser evaluada por medio de la espectroscopía de infrarrojo cercano, permitiendo realizar predicciones aproximadas muy útiles al momento de evaluar esta propiedad.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos justifican las siguientes conclusiones:

- La DB tiene una tendencia ascendente con diferencias significativas en dirección médula – corteza.
- La contracción tangencial y volumétrica presentaron diferencias estadísticamente significativas con tendencia descendente en dirección médula - corteza.
- Los hinchamientos lineales máximos y volumétricos presentaron comportamiento similar al de las contracciones de la madera.
- La contracción radial no presentó diferencias estadísticas con respecto a la posición dentro del tronco, demostrando una mayor homogeneidad en la madera.
- El comportamiento de la madera es independiente de la orientación analizada (Norte Sur) para todas las propiedades físicas estudiadas.
- La DB no es un buen indicador para estimar la estabilidad dimensional de la madera debido a las bajas correlaciones entre densidad básica y contracciones e hinchamiento.

- El coeficiente anisotrópico no sería suficiente indicador de estabilidad dimensional de la madera debiendo utilizarse además clasificaciones basadas en las contracciones tangencial y radial.
- De las procedencias evaluadas las A (Emu Creek, Petford, QLD); LL (Lennard River, WA) e I (Dunham River, WA) resultaron las mejores en cuanto a estabilidad dimensional de la madera para uso sólido.
- La densidad básica media puede ser evaluada por medio de la técnica NIRS, con muy buena precisión de predicción.
- El mejor modelo predictivo para DB fue el ajustado con los espectros tratados mediante primera derivada y a partir de validación independiente.
- La contracción e hinchamiento pueden ser evaluados por medio de la técnica NIRS, con valores aceptables para predicciones preliminares.
- El modelo de mayor robustez para predecir la contracción fue el encontrado a partir de los espectros obtenidos en caras tangenciales, tratados mediante primera derivada y a partir de validación independiente.
- El mejor modelo para el hinchamiento de la madera, se consiguió con espectros adquiridos en caras tangenciales, tratados con derivada, eliminación de outliers y con selección de longitudes de onda.

El uso de la técnica NIRS permitiría predecir la DB con precisión. Para contracción e hinchamiento podrían realizarse predicciones preliminares satisfactorias en la selección de individuos jóvenes para programas de mejoramiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. y S. Sepliarsky. 2005. Tecnología de la madera de eucaliptos colorados: Propiedades – usos – posibilidades. I Jornadas Forestales de Santiago del Estero. Argentina.
- Acuna, M. y G. Murphy. 2007. Uso de espectroscopia infrarroja y análisis multivariado para predecir la densidad de la madera de pino oregón. *Bosque* 28 (3): 187-197.
- Alfini, F. 2013. Manual de clasificación y secado de madera de Lengua. p 161. Proyecto PNUD ARG/08/001- Ministerio de Industria de la Nación. Argentina. Disponible en: <http://docplayer.es/5637457-Manual-de-clasificacion-y-secado-de-madera-de-lenga.html> [Consultado 22-8-2014]
- Almeida, K.; T. Souza; A. Costa; A. Dos Santos e M. Laia. 2018. Near-infrared spectroscopy for the evaluation and prediction of injuries associated with the attack of *Thaumastocoris peregrinus* (Carpintero & Dellapé) in *Eucalyptus camaldulensis* (Dehnh). *Scientia Forestalis* 46 (117): 9-16.
- Alomar, D. y R. Fuchslocher. 1998. Fundamentos de la espectroscopia de reflectancia en el infrarojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes. *Agro Sur* 26 (1): 88-104.

- Alzate, S.; M. Tomazello Filho; S. Piedade. 2005. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. *Scientia Forestalis* 68: 87-95.
- Ananías, R.; C. Díaz y L. Leandro. (2009). Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 11 (3): 251-262.
- Andrade, C. 2009. Espectroscopia no infravermelho próximo para predizer propriedades da madeira e do carvão de plantio clonal de *Eucalyptus* sp. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Lavras. 107p.
- Aparicio, S. 2002. Metodologías analíticas basadas en espectroscopia de infrarrojo y calibración multivariante. Aplicación a la industria petroquímica. Tesis (Doctor en Química). Universidad Rovira I Virgili. España. 218 p.
- Apiolaza, L.; S. Shakti; J. Walker. 2011. Genetic control of very early compression and opposite wood in *Pinus radiata* and its implications for selection. *Tree Genet & Genomes* 7 (3): 563-571.
- Arango, B.; J. Hoyos y A. Vásquez .2001. Variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* en arboles de siete años de edad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 54 (1y2): 1275-1284. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/26717/1/24366-85341-1-PB.pdf> [Consultado 24-5-2012]
- Arantes, M.; P. Trugilho; M. Tomazello Filho; J. Lima e G. Vidaurre. 2016. Densitometria de raios x na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *A. Árvore* 40 (1): 155-162.
- Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la madera. Propiedades físicas de la madera Peso Específico. Sección de Asistencia Técnica. Disponible en: http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_877_16765.pdf [Consultado 19-2-2013]
- Assís, T. 1996. Melhoramento genético do eucalipto. Informe agropecuario, Belo Horizonte 18 (185): 63-71.
- Assís, T. 1999. Aspectos do melhoramento de *Eucalyptus* para obtenção de produtos sólidos da madeira. In: técnicas de abate, processamento e utilização da madeira de eucalipto, p 61-72, Viçosa, Workshop. Brasil.

- Bailléres, H.; F. Davrieux and F. Ham-Pichavant. 2002. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a *Eucalyptus* breeding program. *Annals of Forest Science* 59 (5-6): 479-490.
- Baraúna, E.; A. Nunes; J. Moulin; T. Monteiro; M. Arantes e J. Paes. 2017. Influência de compostos de boro nas propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus* sp. *Scientia Forestalis* 45 (113): 197-204.
- Barreto, C. 2009. Espectroscopia de imagen en el infrarrojo Próximo: Caracterización instrumental y aplicación al análisis de productos sólidos. Tesis (Doctor en Química). Universidad Autónoma de Barcelona. España. 170 p.
- Barría, C.; S. Sandoval y G. Rojas. 2017. Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus radiata*. *Maderas. Ciencia y tecnología* 19 (3): 349-362.
- Benavides, N. 2006. Aplicación de la tecnología NIRS para estimar parámetros indicativos de la calidad de la carne de vacuno. Tesis (Doctor en Producción Animal). Universidad de León. España. 278 p.
- Berger, R. 2000. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 106 p.
- Bernárdez, M. 2006. Utilización de la espectroscopia NIR en el control analítico de la industria farmacéutica desarrollos iniciales en PAT. Tesis (Doctor en Química). Universitat Autònoma de Barcelona. España. 391 p.
- Birkett, M. and M. Gambino. 1988. Potential applications for Near Infrared Spectroscopy in the pulping industry. *Paper Southern Africa* 11 (12): 34-38.
- Blanco, D. (2010) Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales. *Revista Varianza* 7: 18-22.
- Boas, I. 1947. The commercial timbers of Australia: their properties and uses. p 344. CSIRO. Melbourne.
- Boland, D.; M. Brooker; G. Chippendale; B. Hyland; R. Johnston; D. Kleinig and J. Turner. 1984. *Forest Trees of Australia*. Nelson and CSIRO, Melbourne.

- Muniz, G.; W. Magalhães; M. Carneiro e L. Viana. 2012. Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. *Ciência Florestal* 22 (4): 865-875.
- Brasil, M. e M. Ferreira. 1971. variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill ex-Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. *IPEF* 2/3: 129-149. Disponible en: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr02-03/cap08.pdf> [Consultado 5-11-2012]
- Calvo, C.; A. Cotrina; A. Cuffré; J. Piter; P. Stefani; E. Torrán. 2006. Variación radial y axial del hinchamiento, del factor anisotrópico y de la densidad, en el *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Revista Maderas. Ciencia y Tecnología* 8 (3): 159-168.
- Calvo, C.; A. Cotrina; A. Cuffré; J. Piter; P. Stefani; E. Torrán y A. Vivian. 2007. Propiedades de hinchamiento y contracción en la madera de *Eucalyptus grandis* de argentina. *Madeira. Arquitetura & Engenharia* 8 (20): 1-11.
- Cardoso, A.; M. Cagno; P. Cárdenas; F. Gatto. 2013. Contracción, hinchamiento y peso específico aparente de madera de eucalipto colorado (*Eucalyptus tereticornis* Smith). *Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay. INNOTEC* 8: 5-12.
- Carmo, A. 1996. Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Brasil. 74 p.
- Carneiro, M. 2008. Classificação de lâminas de madeira de *Pinus* spp por espectroscopia óptica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 96 p.
- Castello, P. 2007. Avaliação da qualidade de *Pinus taeda* em diferentes sítios de crescimento e espaçamento, através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 151 p.
- Castro, J. 2002. Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 160 p.

- Chies, D. 2005. Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 123 p.
- Chimelo, J. 1980. Anotações sobre anatomia e identificação de madeiras. São Paulo, IPT, (Apostila). 23 p.
- Chippendale, G. 1988. Flora of Australia, Volume 19, Myrtaceae, *Eucalyptus*, *Angophora*. Australian Government Publishing Services, Canberra.
- Cinco, Y. y O. Mercado. 2005. Determinación de las propiedades físicas y de trabajabilidad del *Eucalyptus camaldulensis*. Copérnico: Revista arbitrada de divulgación científica: año I (2): 60-64.
- Coronel, O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, 1º parte, fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1ed. Santiago del Estero.
- Corporación Chilena de la Madera. 2007. Manual de Construcción de Viviendas en Madera. Disponible en: <http://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2016/11/Cap%20C3%ADtulo-1.La-construccion-de-viviendas-en-madera-completo-sin-introducci%C3%B3n-5.pdf?x72000> [Consultado 9-8-2011]
- Costa, E.; M. Rocha; P. Hein; E. Amaral; L. Santos; L. Brandão e P. Trugilho. 2018. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 26 (2): 106-116.
- Crespo, E.; S. Silva; P. Trugilho e A. Moura. 2008. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. *Cerne* 14 (2): 147-152.
- Cruz, A. 2003. Variabilidad en el árbol de las dimensiones de las fibras y de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Universidad Autónoma Chapingo. 76 p.
- Davrieux, F.; P. Rousset; T. Pastore; L. Macedo and W. Quirino. 2010. Discrimination of native wood charcoal by infrared spectroscopy. *Quimica Nova* (33) 5: 1093-1097.

- Delgado, E. 2003. Caracterización cuantitativa y cualitativa de lomo curado de cerdo ibérico, mediante análisis espectral en el infrarrojo cercano (NIRS). E.T.S de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. España.
- Delmastro, R.; J. Díaz-Vaz.; J. Schlatter. 1980. Variabilidad de las características hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don). Revisión bibliográfica. Investigación y desarrollo forestal. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 157p.
- Delwiche, S. and J. Reeves. 2004. The effect of spectral pretreatments on the pls modeling of agricultural products. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 12 (3): 177-182.
- Deming, S.; Y. Michotte; D. Massart; L. Kaufman and B. Vandeginste. 1988. *Chemometrics: A textbook* (Vol. 2). Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Di Rienzo, J.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz, M. 2013. Proyecto de una empresa dedicada a realizar pruebas NDT. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México. 137 p.
- Doldán, J. 2003. Indicadores de Calidad de Madera *Eucalyptus grandis* de Río Negro, Uruguay: Contenido de Humedad, Densidad, Contracción y Largo de fibras. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA. Informe de Investigación N° 9. Uruguay. 41 p.
- Dorado M.; E. Astini; M. Tablada; M. Bolatti. 1995. Densidad de la madera de tres especies de pinos en la zona de rio de los sauces (Córdoba, Argentina). *Investigación Agraria: Sistemas de Recursos Forestales* 4 (2): 263-274.
- Downey, G. 1996. Authentication of food and food ingredients by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 4 (1): 47-61.
- Durlo, M. e J. Marchiori. 1992. *Tecnologia da madeira: reatibilidade*. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 33 p. (Série Técnica, 10)
- Eldridge, K.; J. Davidson; C. Hardwood and G. van Wyk. 1993. *Eucalypt Domestication and Breeding*. Oxford Science Publications. USA. 288 p.

- Estopa, R.; F. Milagres; R. Oliveira; P. Hein. 2017. NIR spectroscopic models for phenotyping wood traits in breeding programs of *Eucalyptus benthamii*. *Cerne* 23 (3): 367-375.
- Evans, R.; S. Stringer and P. Kibblewhite. 2000. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita Journal* 53 (5):450-457. Disponible en: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/File%2010.pdf> [Consultado 14-3-2014]
- Fahey, L.; M. Nieuwoudt and P. Harris. 2018. Using near infrared spectroscopy to predict the lignin content and monosaccharide compositions of *Pinus radiata* wood cell walls. *International Journal of Biological Macromolecules* 113: 507-514.
- Ferreira, C.; M. Freitas e M. Ferreira. 1979. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu (S.P.). *Scientia Forestalis* 18: 106-117.
- Ferreira, M. 1970. Estudo da variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reiw e *Eucalyptus saligna* Smith. *Scientia Forestalis* 1: 83-96.
- Ferreira, M. 1972. Variação da densidade básica da madeira depovoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 14 anos. *IPEF* 4: 65-89.
- Foglia, R. 2005. Conceptos básicos sobre el secado de la madera. Kurú: *Revista Forestal* 2 (5): 88-92.
- Fornés, L. y E. Pan. 2003. Estabilidad dimensional, densidad básica y productividad en orígenes de *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda*. Proyecto forestal. Una bibliografía de experiencias e investigaciones del proyecto forestal de desarrollo 1996-2004. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Buenos Aires. Argentina.
- Fuentes, F.; J. Silva; M. Lomelí; H. Richter; R. Sanjuán. 2002. Comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass). *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8 (1): 49-56.
- Gamboa, J. 2010. Cuantificación de hormonas en comprimidos farmacéuticos por espectroscopía NIR: Comparación de procedimientos de calibración. Disertación (Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Químicas). Universidad Autónoma de Barcelona. España. 35 p.

- García, J. 2002. Clasificación y autenticación de canales de cerdo ibérico mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS). Tesis (Doctor en Ciencias Químicas). Universidad de Córdoba. España. 370 p.
- Gonçalez, J.; N. Santos; F. Silva Junior; R. Souza and M. Hermida. 2018. Growth ring width of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and its relationship with wood properties. *Scientia Forestalis* 46 (118): 197-204.
- Gonçalves, F. 2006. Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* para produtos sólidos. Dissertação. (Programa de pós-graduação em produção vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil. 154 p.
- Gonçalves, F.; J. Oliveira; R. Della Lucia; M. Nappo e R. Sartório. 2009. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. *Árvore* 33 (2): 277-288
- Gonçalves, T. 2016. Anatomia e espectroscopia no infravermelho próximo para fiscalização de carvão vegetal no Brasil. Tese (Doutor em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 102 p.
- González, D.; F. Cisneros; J. Moglia; C. López; M. Venturini. 2011. Índices de selección por diámetro y penetración de pilodyn en familias de polinización abierta de *Eucalyptus camaldulensis* en Santiago del Estero. I Congreso Forestal del Chaco Sudamericano. Filadelfia, Paraguay.
- González, D.; J. Moglia; A. López; M. Pece; J. López y R. Moreno. 2014. Estimación de las tensiones de crecimiento en individuos selectos de *Eucalyptus camaldulensis* mediante extensómetro e índice de rajado. *Quebracho* 22 (1,2): 57-65. Gouvêa, A.; P. Trugilho; J. Gomide; J. Silva; C. Andrade e I. Alves. 2011. Determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Árvore* 35 (2): 349-358.
- Gragera, F. 2015. Desarrollo de un modelo predictivo usando tecnología NIRs para determinar las extracciones del triticale de doble aptitud (forraje y grano). Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. España. 305p.
- Gutiérrez, A. 2010. La espectroscopia NIR en la determinación de propiedades físicas y composición química de intermedios de producción y productos acabados. Tesis (Doctor en Química) Universidad Autónoma de Barcelona. España. 251 p.

- Hein, P. 2008. Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Brasil. 75 p.
- Hein, P.; A. Campos; P. Trugilho; J. Lima and G. Chaix. 2009. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. *Cerne* 15 (2): 133-141.
- Hein, P.; H. Pakkanen and A. Dos Santos. 2017. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. *Forest Systems* 26 (3): 1-10.
- Hein, P.; J. Lima e G. Chaix. 2009. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 17 (3): 141–150.
- Hein, P.; J. Lima e G. Chaix. 2010. Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de *Eucalyptus*. *Floresta* 40 (3): 615-624.
- Higa, A.; P. Kageyama e F. Ferreira. 1973. Variação da densidade básica da madeira de *P. elliotii* var. *elliotii* e *P. taeda*. *Scientia Forestalis* 7 (1): 79-91.
- Hoffmeyer, P. and J. Pedersen. 1995. Evaluation of density and strength of Norway spruce by near infrared reflectance spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53 (3): 165-170.
- Igartúa, D.; S. Monteoliva; J. Piter. 2009. Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* en Argentina. *Revista Maderas. Ciencia y Tecnología* 11 (1): 3-18.
- Igartúa, D.; S. Monteoliva; M. Monterubbianesi y M. Villegas. 2002. Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*: II. Variaciones en la densidad básica y la longitud de fibras en Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 105 (1): 29-39.
- Instituto Argentino De Normalización. 1973. Norma IRAM 9544: Maderas. Método de determinación de la densidad aparente. Buenos Aires. Argentina.
- International Organization for Standardization (ISO). 1981. ISO 4469. Determination of radial and tangential shrinkage. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 2 p.

- Jenck, S.A. 2010. Identificación y análisis cuantitativo de dietilenglicol y glicerol. Boletín Centro NIR-Raman. Disponible en: <https://www.notijenck.com.ar/aplicaciones/identificacion-y-analisis-cuantitativo-de-dietilenglicol-y-glicerol> [Consultado 21-8-2015]
- Jones, P.; L. Schimleck; G. Peter; R. Daniels and A. Clark. 2005. Nondestructive estimation of *Pinus taeda* L. wood properties for samples from a wide range of sites in Georgia. Canadian Journal of Forest Research 35 (1): 85–92.
- Jozsa, L. y G. Middleton. 1994. A discussion of wood quality attributes and their practical implications. Forintek Canada Corp. Western Laboratory. 42 p.
- Junior, L. e J. Garcia. 2004. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. Scientia Forestalis 65: 120-129.
- Kelley, S.; T. Rials; R. Snell; L. Groom and A. Sluiter, 2004. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. Wood Science and Technology 38 (4): 257-276.
- Klock, U. 2000. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H.E. Moore. Tese (Doutor em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 291 p.
- Kokutse, A.; L. Brancheriau and G. Chaix. 2010. Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. Annals of Forest Science 67 (4): 403.
- Kollmann, F. 1959. Tecnología de la Madera y sus aplicaciones. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicios de La Madera. p. 675.
- Kollmann, F. and W. Côté. 1968. Principles of wood science and technology. Berlin: Springer, vol. 2, 674 p.
- Ladrach, W. 1984. Calidad de madera de *Pinus patula* Schl. et Cham. Informe de Investigación N° 92. Smurfit Cartón de Colombia Investigación Forestal. Cali, Colombia.
- Latorraca, J. e C. Albuquerque. 2000. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. Floresta e Ambiente 7 (1): 279-291.
- Leardi, R.; M. Seasholtz e R. Pell. 2002. Variable selection for multivariate calibration using a genetic algorithm: prediction of additive concentrations in polymer

films from Fourier transform-infrared spectral data. *Analytica Chimica Acta* 461 (2): 189-200.

- Lima, J.; R. Sartório; P. Trugilho; C. Cruz e R. Vieira. 2007. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* 75: 85-93.
- Lima, T. 1996. Variações no sentido radial e longitudinal de algumas propriedades das madeiras de *Eucalyptus microcorys* F. Muell e *Eucalyptus pilularis* Sm. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. 106 p.
- Lopes, C.; A. Nolasco; M. Tomazello Filho; C. Dias e A. Pansini. 2011. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. *Ciência Florestal* 21 (2): 315-322.
- Lopes, M. 2008. Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada na avaliação de painéis de madeira colados lateralmente. Tesis (Doutor em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná. Brasil. 110 p.
- López, A., P. Genes y J. López. 2010. Evaluación no-destructiva de la densidad de la madera de árboles vivos en pie de *Eucalyptus grandis* utilizando resistógrafo. XXIV jornadas forestales de Entre Ríos. Concordia. Disponible en https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2010/trab_res_pos/445.15.T.LOPEZ.pdf [Consultado 10-3-2015]
- López, C. 2004. Variación genética en procedencias y progenies de *Eucalyptus camaldulensis* introducidas en el noroeste Argentino. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. España.
- López, J. y G. Staffieri. 2003. Variación radial de la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* a los 21 años de edad. XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina. 8 p. Actas en CD. Disponible en: http://anterior.inta.gov.ar/bellavista/info/documentos/forestales/variacion_radial.pdf [Consultado 19-05-2010]
- López, P. 2003. Características anatómicas y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dhnh. Proveniente de la plantación “Ing. Mario Ávila” en Texcoco Estado de México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 104 p.

- Luengo, M. 1995. Experiencia Chilena en el aserrío de eucalipto y pino. IV Simposio Floresta Do Rio Grande do Sur, p. 48-62. Porto Alegre, Brasil.
- Mangieri, H. y M. J. Dimitri. 1961. Los eucaliptos en la silvicultura. Editorial ACME SACI. Buenos Aires. 226 p.
- Mantero, C. 1999: Propiedades físicas y mecánicas de los Eucaliptos: *E. grandis*; *E. globulus*; *E. tereticornis*. Uruguay Forestal 9 (21): 13-16.
- Mantero, C.; H. O'Neill; A. Cardoso y A. Castagna. 2014. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de *Eucalyptus bosistoana* F. Muell. cultivada en Uruguay. Agrociencia Uruguay 18 (1): 65-74.
- Marcó, M. y Harrand. 2005. Valor potencial de los Eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. I Jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Argentina.
- Milagres, F. 2008. Representatividade da densidade básica média da árvore de eucalipto determinada no DAP. In: Congresso anual de celulose e papel, ABTCP, 42., Anais. São Paulo.
- Milagres, F.; J. Gomide; A. Magaton e H. Neto. 2013. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. *Árvore* 37 (6): 1165-1173.
- Missanjo, E. and J. Matsumura. 2016. Genetic improvement of wood properties in *Pinus kesiya* Royle ex Gordon for sawn timber production in Malawi. *Forests* 7 (11): 253.
- Moglia, J.; A. Giménez; D. González y R. Gerez. Caracterización de los anillos de crecimiento y su relación con la densidad básica de la madera en *Eucalyptus camaldulensis*. *Revista Quebracho* 18 (1,2): 47-57.
- Moncada, G. 2006. Espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) en el análisis cuantitativo y cualitativo de carne de cordero. Disertación (Magister en Ciencias, mención Producción Animal). Universidad Austral de Chile. 84 p.
- Monteoliva, S. 2011. Determinación de densidad de la madera de sauces con pilodyn: calibración. Tercer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Disponible en: <http://jornadasdesalicaceas2011.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos.html> [Consultado 21-5-2015]

- Monteoliva, S.; G. Senisterra; J. Marquina; R. Marlats y S. Villegas. 2002. Estudio de la variación de la densidad básica de la madera de ocho clones de sauce (*Salix* spp.). Rev. Fac. Agron. 105 (1): 77-82.
- Nisgoski, S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. teses (Doutor em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Brasil. 160 p.
- Núñez, C. 2007. Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Revista de Ciencia y Tecnología 9: 44-50. Disponible en: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/126-ConversdensRECYT.pdf> [Consultado 13-11-2015]
- Núñez, C. 2007. Relaciones de Conversión entre Densidad Básica y Densidad Seca de Madera. Revista de Ciencia y Tecnología 9: 44-50.
- O'Neill, H.; F. Tarigo; P. Iraola. 2004. Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte del Uruguay. Montevideo: Dirección General Forestal, Sociedad de Productores Forestales, Asociación de Industriales de la Madera, LATU Sector Productos Forestales. Disponible en: http://catalogo.latu.org.uy/doc_num.php?explnum_id=558 [Consultado 29-11-2012]
- Oliveira, J. e J. Silva. 2003. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. *Árvore* 27 (3): 381-385.
- Oliveira, J.; J. Hellmeister e M. Tomazello Filho. 2005. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Árvore* 29 (1): 115-127.
- Oliveira, J.; M. Tomazello Filho; N. Fiedler. 2010. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. *Árvore* 34 (5): 929-936.
- Oliveira, R. e A. Bispo da Silva. 2014. William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha. Revista Brasileira de Ensino de Física 36 (4): 4603.
- Omonte, M. y L. Valenzuela. 2011. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. Revista Maderas. Ciencia y Tecnología 13 (2): 211-224.

- Osborne, B.; T. Fearn and P. Hindle. 1993. Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis. 2ªEd. Longman Singapore Publishers. 227 p.
Sacado de Fundamentos de nir. Pdf
- Palacios, G.; R. Navarro y A. Del Campo 2001. Desarrollo y evaluación de una ecuación NIRS para la determinación del contenido de almidón en raíces de plantas forestales. En III Congreso Forestal Nacional. Granada. Disponible en: <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/issue/view/185> [Consultado 7-10-2016]
- Pasquini, C. 2003. Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. Journal of the Brazilian Chemical Society 14 (2): 198-219.
- Peguero, A. 2010. La espectroscopia NIR en la determinación de propiedades físicas y composición química de intermedios de producción y productos acabados. Tesis (Doctorado en Química). Universidad Autónoma de Barcelona. España. 252 p.
- Pereira, H.; J. Santos and O. Anjos. 2016. Fibre morphological characteristics of Kraft pulps of *Acacia melanoxylon* estimated by NIR-PLS-R models. Materials 9 (1): 8. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/1/8>. [Consultado 11-9-2015]
- Pereyra, O y M. Gelid. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. Floresta 33 (3): 3-19.
- Phillips, E. 1963. Timber improvement by tree selection and breeding. FAO. World Consultation on Forest Genetics and Tree Improvement. Stockholm. Sweden, p. 62
- Pincelli, A.; D. Dantas; M. Souza; A. Dias Júnior; A. Ferreira; A. Neto; M. Tomazello Filho e J. Brito. 2017. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Floreanopolis. Disponible en: <https://proceedings.science/cbctem/papers/densitometria-de-raios-x-nas-madeiras-provenientes-de-plantios-de-restauracao-florestal-visando-uso-energetico> [Consultado 15-11-2016]
- Poke, F. and C. Raymond. 2006. Predicting extractives, lignin and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in *Eucalyptus globulus*. Journal of Wood Chemistry and Technology 26 (2): 187-199.

- Potulski, D. 2010. Densidade e retratibilidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore e *Pinus taeda* L. Universidade Federal do Paraná. Brasil. 48 p.
- Prado, J. y S. Barros. 1989. *Eucalyptus*: Principios de silvicultura y manejo. INFOR-CORFO. Impresos Nova Ltda. Santiago. Chile. p. 199. Disponible en: <http://biblioteca1.infor.cl/index.asp?param=o%AD%88%92bo%96%8Cm&Op=12>. [Consultado 15-08-2012].
- Raymond, C.; L. Schimleck; A. Muneri and A. Michell. 2001. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. III. predicted pulp yield using near infrared reflectance analysis. *Wood Science and Technology* 35 (3): 203-215.
- Rezende, M. e E. Ferraz. 1985. Densidade anual da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis* 30: 37-41.
- Ribeiro, P. 2009. Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais). Universidade de Brasília. Brasil. 114 p.
- Rocha, M. 2000. *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Brasil. 185 p.
- Rodrigues, R. 2002. Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo. 84 p.
- Romão, S.; J. Matos; L. Silva; A. Higa. 2012. Agrupamento de famílias de meio-irmãos de *Pinus taeda* baseado em características físicas e mecânicas da madeira. *Floresta* 42 (3): 435-442.
- Rosso, S. 2010. Predição das propriedades de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). Tese (Doutor em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Brasil. 125 p.
- Samistraro, G. 2008. Propriedades químicas e físicas da polpa e papel kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Dissertação (Mestre em Ciências). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 115 p.

- Sánchez, D. y G. Ríos. 2007. Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. Revista Chapingo 13 (2): 143-156.
- Santos, H. 2010. Padronização de ensaios para identificação de preservantes em postes de madeira e solos de áreas controladas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 109 p. Disponible en: <http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/3162/1/425614.pdf> [Consultado 10-6-2014]
- Schimleck, L. 2008. Near-infrared spectroscopy: A rapid non-destructive method for measuring wood properties, and its application to tree breeding. New Zealand Journal of Forestry Science 38 (1): 14-35.
- Schimleck, L.; J. Doran and A. Rimbawanto. 2003. Near infrared spectroscopy for cost-effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. Journal of Agricultural and Food Chemistry 51 (9): 2433-2437.
- Schimleck, L.; R. Evans. 2004. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. Holzforschung 58: 66-73.
- Schultz, T. and D. Burns. 1990: Rapid secondary analysis of lignocellulose: comparison of near infrared (NIR) and fourier transform infrared (FTIR). Tappi Journal 73 (5): 209-212.
- Sette, C.; M. Tomazello Filho; J. Lousada; D. Lopes and J. Laclau. 2016. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. Árvore 40 (2): 337-346.
- Shenk, J. and M. Westerhaus. 1994. "The application of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to forage analysis". En: Forage Quality, evaluation and utilization. Fahey, G. Univ. of Nebraska. 406-448 p.
- Shenk, J. and M. Westerhaus. 1996. "Calibration the ISI way". En: Near Infrared Spectroscopy: The future Waves. Davies, A. and P. Williams. Chichester, UK. 198-202 p.
- Shenk, J.; J. Workman and M. Westerhaus. 2001. Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In Handbook of Near Infrared Analysis. 2^{da} Edition. Burns, D.A., Ciurczac, E.W. (Eds.). Marcel Dekker, Nueva York. (USA). 419-474 p.

- Silva, C.; C. Xavier; P. Dos Santos; A. Carvalho; J. Latorraca e P. Brancalion. 2017. Estimativa da densidade da madeira em árvores vivas de *Cedrela fissilis* Vell. através de resistografia. *Scientia Forestalis* 45 (113): 139-144.
- Silva, J. e J. Oliveira. 2003. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. *Árvore* 27 (2): 233-239.
- Souza, V.; M. Carpinim; L. Barrichelo. 1986. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posição em árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. *Scientia Forestalis* 33: 65-72.
- Spavento, E.; G. Keil y S. Monteoliva. 2008. Propiedades físicas propiedades físicas de la madera. Curso de xilotecnología. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias Y Forestales. Universidad Nacional de la Plata. Disponible en: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1689/mod_resource/content/0/Propiedades_Fisicas_2008.pdf [Consultado 13-6-2013]
- Taylor, A.; S. Baek; M. Jeong and G. Nix. 2008. Wood shrinkage prediction using NIR spectroscopy. *Wood Fiber Science* 40 (2): 301-307.
- Thiersch, C.; J.Scolforo; A. Oliveira; G. Rezende; R. Maestri. 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus sp.* *Cerne* 12 (3): 264-278.
- Thumm, A. and R. Meder. 2001. Stiffness prediction of radiate pine clearwood test pieces using near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 9 (2): 117-122.
- Tinto, J. 1991. Características y aserrado de rollizos de *Eucalyptus grandis*. VI Jornadas Forestales de Entre Ríos. p. 27-50
- Tomazello Filho, M. 1985. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. *Scientia Forestalis* 29: 37-45.
- Toro M.; Ruiz J.; Velásquez J.; Gómez L. (2009) Gradiente radial del peso específico en la madera de *Carapa guianensis* Aublet (Meliaceae). *Revista Forestal Venezolana* (53) 1: 75-81.

- Trevisan, R.; C. Haselein; R. Melo; D. Stangerlin; R. Beltrame; D. Gatto; L. Calegari. 2008. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Floresta 38 (3): 553-559.
- Triana, J. 2012. La espectroscopia y su desarrollo como una herramienta didáctica para comprender la estructura de la materia. Disertación (Maestría en la Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales). Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 76 p.
- Trugilho, P. e B. Vital. 1996. Correlação entre algumas características físicas, químicas e anatómicas e a variação dimensional da madeira de eucalipto. Arvore 20 (4): 515-533.
- Viana, L. 2008. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus*. Dissertação (Mestre em Ciência em Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Brasil. 111 p.
- Viana, L.; P. Trugilho; P. Hein; J. Lima e J. Silva. 2009. Predicting the morphological characteristics and basic density of *Eucalyptus* wood using the NIRS technique. Cerne 15 (4): 421-429.
- Westerhaus, M.O. 1989. "Interpretation of regression statistics". En: Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): analysis of forage quality. G.C. Marten, G.; J. Shenk, and F.E. Barton II, (eds.). USDA, Agric. Handbook N° 643. EE. UU. 39-40 p.
- White, B.; L. Polanco and C. Verret. 2006. Utilization of NIR spectroscopy for factory control. En: Proc. Sugar Processing Research Conference, Frontiers in Sugar Processing, Aguas de Sao Pedro, Brazil, p. 230-244.
- Williams, P and D. Sobering. 1993. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. Journal of Near Infrared Spectroscopy 1 (1): 25-32.
- Williams, P and K. Norris. 2001. Near-infrared technology. 2^{ed}. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 296 p.
- Zanuncio, A.; A. Carvalho; A. Carneiro; M. Tomazello Filho; P. Valenzuela; W. Gacitúa and J. Colodette. 2018. Anatomical, ultrastructural, physical and mechanical

wood properties of two-year-old *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones. *Árvore* 42 (2):1-8.

Zobel, B. y J. van Buijtenen. 1989. *Wood variation: Its causes and control*. Springer-Verlag, Berlín. Germany. 363 p.

Zossi, S.; R. Ruiz; N. Sorol y M. Sastre. 2010. Espectroscopia por infrarrojo cercano (NIRS). Su aplicación en análisis de jugos de caña de azúcar. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 87 (1): 15-27.

Zumaeta, L.; M. Tomazello Filho; L. Viana; D. Castillo; F. Alza y G. Torres. 2009. Uso de la densitometría de rayos X y de la espectroscopia en el infrarrojo cercano para predecir las propiedades tecnológicas de la madera en especies forestales. *Xilema* 22: 81-86. Disponible en: http://www.academia.edu/15459714/Revista_Xilema_Vol._22 [Consultado 13-6-2013]

ANEXOS

Anexo 1

Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos en la densidad básica de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_Densidad.gr.cm3_REML<-
lme(Densidad.gr.cm3~1+orientacion+Posicion+orientacion:Posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
668	-3172,9	-3119	1598,45	0,02	0,39	0,64	0,86	0,98

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	500	1865,59	<0,0001
orientación	1	134	0,21	0,6475
Posición	2	134	218,68	<0,0001
orientación:Posición	2	134	0,43	0,6525

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Posición	Medias	E.E.	
Externa	0,72	0,02	A
Media	0,67	0,02	B
Interna	0,59	0,02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 2

Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para las contracciones de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Contracción Radial**Especificación del modelo en R**

```
mlm.modelo.001_Contr.Rd_REML<-
lme(Contr.Rd~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varExp(form=~fitted(.)|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
970	2335,03	2398,36	-1154,5	0,19	2,10E-03	2,10E-03	0,5	0,83

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	808	1343,97	<0,0001
orientación	1	128	0,02	0,8969
posición	2	128	0,06	0,9434
orientación:posición	2	128	0,64	0,5298

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Posición	Medias	E.E.	
Externa	7,25	0,22	A
Media	7,23	0,22	A
Interna	7,19	0,23	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Contracción Tangencial**Especificación del modelo en R**

```
mlm.modelo.001_Contr.tg_REML<-
lme(Contr.tg~1+Orientacion+Posicion+Orientacion:Posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varExp(form=~fitted(.)|Posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
995	1928,68	1992,34	-951,34	0,14	0,19	0,4	0,76	0,96

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	827	722,99	<0,0001
Orientación	1	134	0,14	0,7098
Posición	2	134	66,81	<0,0001
Orientación:Posición	2	134	1,03	0,3581

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Posición	Medias	E.E.	
Interna	11,62	0,42	A
Media	10,97	0,41	B
Externa	9,34	0,41	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Contracción Volumétrica

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_Contr.Vol_REML<-
lme(Contr.Vol~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
996	3162,61	3221,38	-1569,3	0,78	0,1	0,27	0,72	0,93

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	829	1102,26	<0,0001
orientación	1	133	0,08	0,7778
posición	2	133	33,2	<0,0001
orientación:posición	2	133	1,6	0,205

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

posición	Medias	E.E.	
Interna	19,38	0,6	A
Media	18,59	0,6	B
Externa	16,97	0,6	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 3

Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para el factor anisotrópico de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_anisotropia.contr_REML<
lme(anisotropia.contr~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
989	-740,08	-676,5	383,04	0,06	0,19	0,19	0,51	0,84

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	821	1982,09	<0,0001
orientación	1	134	0,41	0,5235
posición	2	134	41,88	<0,0001
orientación:posición	2	134	0,09	0,9122

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

posición	Medias	E.E.	
Interna	1,65	0,04	A
Media	1,57	0,04	B
Externa	1,33	0,04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo 4

Tabla de salidas del software Infostat para el análisis de varianza mediante aplicación de modelos mixtos para el hinchamiento de la madera de *Eucalyptus camaldulensis*.

Hinchamiento Radial

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_Hinch.Rd_REML<-
lme(Hinch.Rd~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varExp(form=~fitted(.)|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
1006	2699,97	2763,77	-1337	0,2	2,00E-03	2,00E-03	0,49	0,83

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	838	1173,91	<0,0001
orientación	1	134	0,01	0,9392
posición	2	134	0,1	0,9092
orientación:posición	2	134	0,46	0,6337

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

posición	Medias	E.E.	
Externa	7,84	0,3	A
Interna	7,77	0,3	A
Media	7,76	0,3	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Hinchamiento Tangencial

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.005_Hinch.tg_REML<-
lme(Hinch.tg~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varPower(form=~fitted(.)|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data05
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
981	2242,01	2305,48	-1108	0,04	0,19	0,38	0,76	0,97

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	813	562,82	<0,0001
orientación	1	134	0,13	0,7168
posición	2	134	63,18	<0,0001
orientación:posición	2	134	1	0,3696

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

posición	Medias	E.E.	
Interna	13,25	0,5	A
Media	12,4	0,5	B
Externa	10,31	0,5	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Hinchamiento Volumétrico

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_Hinch.Vol_REML<-
lme(Hinch.Vol~1+orientacion+posicion+orientacion:posicion
,random=list(Procedencia=pdIdent(~1)
,Arbol=pdIdent(~1)
,Ind=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|posicion))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data01
,keep.data=FALSE)
```

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1	R2_2	R2_3
994	3552,74	3611,48	-1764,4	0,83	0,11	0,16	0,54	0,97

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	826	930,12	<0,0001
orientación	1	134	0,66	0,4191
posición	2	134	16,17	<0,0001
orientación:posición	2	134	2,13	0,1223

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

posición	Medias	E.E.	
Interna	22,57	0,8	A
Media	20,77	0,8	B
Externa	18,67	0,8	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)