

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

SELECCIÓN DE *Eucayptus grandis* HILL (EX MAIDEN) POR MODULO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE ROTURA DE SU MADERA.

por

Paola SERRENTINO GIGENA
José Luis VIERA FERRARI

TESIS presentada como uno de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2006

Tesis aprobada por:

Director: -----
Carlos Mantero

Jorge Franco

Juan Pedro Posse

Fecha: -----

Autor: -----
Paola Serrentino Gigena

José Luis Viera Ferrari

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a todas las personas que colaboraron en la realización de este trabajo. En especial al Ing. Agr. Carlos Mantero, por su colaboración y paciencia durante todo este proceso; al Dr. Jorge Franco, por su apoyo en el procesamiento de datos. A mi amigo y futuro Ing. Agr. Adrián Cal, por su desinteresada e incansable colaboración. Por último, agradecemos a nuestras familias por el constante apoyo a lo largo de toda la carrera.

Gracias totales!!

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA.....	3
2.1.1. <u>Generalidades</u>	3
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS.....	4
2.2.1. <u>Factores que afectan las propiedades físicas de la madera</u>	4
2.2.2. <u>Peso específico y densidad de la madera</u>	5
2.2.2.1. Características generales.....	5
2.2.2.2. Valores característicos.....	7
2.2.2.3. Variación dentro del árbol.....	7
2.2.2.4. Variación entre árboles (variación genética).....	10
2.2.2.5. Variación con la edad.....	11
2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	12
2.3.1. <u>Factores que afectan las propiedades mecánicas de la</u> <u>madera</u>	14
2.3.1.1. Tipo de madera (Juvenil/Adulta).....	14
2.3.1.2. Densidad.....	17
2.3.1.3. Defectos.....	18
2.3.1.4. Variación con la edad.....	19
2.3.2. <u>Módulo de elasticidad (MOE)</u>	19
2.3.2.1. Características generales.....	19
2.3.2.2. Valores característicos.....	20
2.3.2.3. Variación dentro del árbol.....	21
2.3.2.4. Variación entre árboles (variación genética).....	22
2.3.3. <u>Módulo de rotura (MOR)</u>	23
2.3.3.1. Características generales.....	23
2.3.3.2. Valores característicos.....	23
2.3.3.3. Variación dentro del árbol.....	24
2.3.3.4. Variación entre árboles (variación genética).....	25
2.4. <u>CORRELACIONES ENTRE LAS DISTINTAS PROPIEDADES</u>	25
2.4.1. <u>Correlación entre propiedades físicas y mecánicas</u>	25
2.4.2. <u>Correlaciones entre distintos ensayos</u>	25
2.4.3. <u>Correlación entre métodos destructivos y no destructivos</u>	26

2.5. FAKOPP.....	26
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	30
3.1. PREPARACION DE PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS.....	30
3.2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE) Y MÓDULO DE ROTURA (MOR).....	33
3.2.1. <u>Medición con FAKOPP (método no destructivo)</u>	33
3.2.2. <u>Medición con Máquina Universal (método destructivo)</u>	34
3.2.3. <u>Determinación del Volumen y del Peso Específico Aparente Corriente</u>	35
3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	36
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
4.1. ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, EL MÓDULO DE ROTURA Y LA DENSIDAD SEGÚN UBICACIÓN EN EL RADIO.....	37
4.1.1. <u>Densidad Básica</u>	37
4.1.2. <u>Módulo de Elasticidad (MOE)</u>	38
4.1.3. <u>Módulo de Rotura (MOR)</u>	39
4.2. ANAVA Y COMPARACION DE MEDIAS.....	41
4.3. VARIANZAS.....	43
4.3.1. <u>Variación entre y dentro de la posición</u>	43
4.3.2. <u>Intervalos de confianza</u>	45
4.3.3. <u>Pruebas F</u>	46
4.4. INFLUENCIA DE LA EDAD EN LAS DISTINTAS PROPIEDADES....	48
4.4.1. <u>Modelos lineales</u>	49
4.5. VARIACION ENTRE GRUPO DE ARBOLES.....	49
4.6. PREDICCIÓN DE MOE A PARTIR DE DENSIDAD.....	50
4.7. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE FAKOPP.....	54
5. <u>CONCLUSIONES</u>	58
6. <u>RESUMEN</u>	59
7. <u>SUMMARY</u>	60
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	61
9. <u>ANEXOS</u>	67

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Densidad básica media para todos los árboles según posición en el radio.....	37
2.	MOE medio para todos los árboles según posición en el radio.....	38
3.	MOR medio para todos los árboles según posición en el radio.....	39
4.	Análisis de varianza.....	41
5.	Comparación de medias para las tres variables.....	42
6.	Estimadores de varianza según posición en el radio y direcciones.....	43
7.	Intervalos de confianza (95%) para las varianzas.....	45
8.	Comparación de varianzas.....	46
9.	Modelos lineales ajustados por edad según Distancia y Variable.....	49
10.	Variabilidad entre árboles según grupo de edad.....	50
11.	Modelos lineales ajustados para MOE a partir de Densidad según Edad.....	51
12.	Coefficiente de correlación de Pearson.....	54
13.	Modelos lineales ajustados según grupo de edad.....	57
Figura No.		
1.	Tallo de <i>P. radiata</i> según una nueva clasificación de zonas de madera.....	16
2.	Modo de uso del instrumento FAKOPP.....	28

3. Esquema de utilización del equipo FAKOPP.....	29
4. Esquema de corte de las trozas.....	31
5. Obtención de las probetas libres de defectos.....	32
6. Clasificación de probetas según posición y dirección en el radio.....	33
7. Esquema de Flexión estática.....	35
8. Comportamiento de la Densidad básica según posición en el radio.....	37
9. Comportamiento del MOE según la posición en el radio.....	39
10. Comportamiento del MOR según posición en el radio.....	40
11. Variación de la Densidad dentro de cada posición en el radio.....	47
12. Variación del MOE dentro de cada posición en el radio.....	47
13. Variación del MOR dentro de cada posición en el radio.....	48
14. Modelo ajustado para el MOE en función de la Densidad (Grupo 2).....	52
15. Modelo ajustado para el MOE en función de la Densidad (Grupo 3).....	53
16. Relación entre Fakopp y MOE promedio para grupo 1.....	55
17. Relación entre Fakopp y MOE PC promedio para grupo 1.....	55
18. Relación entre Fakipp y MOE promedio para grupo 2.....	56
19. Relación entre Fakopp y MOE PC para grupo 2.....	56

1. INTRODUCCIÓN.

Eucalyptus es uno de los géneros de rápido crecimiento mas difundidos en el mundo en las últimas décadas. En Uruguay la promulgación de la ley N° 15.939 estimuló el crecimiento y el desarrollo del sector forestal. Actualmente la superficie plantada en nuestro país con este género asciende a más de 670.000 hectáreas (URUGUAY. MGAP, 2005).

En los próximos años, se espera un aumento de las posibilidades de colocación de productos derivados de la madera de *Eucalyptus grandis*. Para el año 2010 se espera un descenso en la oferta de madera por parte de países asiáticos (Malasia e Indonesia) como de países africanos, por lo que las plantaciones de rápido crecimiento de países de América del Sur se transformarían en importantes proveedoras de materia prima para el mercado mundial.

La densidad es un índice de calidad de la madera que esta íntimamente asociado a las propiedades mecánicas y a otras propiedades físicas. Es un factor determinante de su aptitud para la industrialización. Para uso estructural son limitantes la resistencia a la flexión y a la compresión.

Hasta el momento, la calidad de la madera para usos específicos no ha sido considerada en los programas de mejoramiento genético. Los mismos se concentran en la selección por velocidad de crecimiento, forma del fuste, etc. Dadas las ventajas competitivas y comparativas actuales parece adecuado encarar los futuros programas de mejoramiento orientados al aumento de la calidad de la madera estructural.

La optimización en la utilización del *Eucalyptus* como madera aserrada depende de conocimientos más profundos de sus características. Las propiedades de la madera de este género presentan variaciones tanto de médula a corteza como desde la base a la copa de los árboles. El conocimiento de esas variaciones y de sus magnitudes puede ser de gran relevancia para la definición de la mejor forma de procesamiento de la madera, minimizando sus defectos y aumentando el rendimiento de los productos aserrados.

A continuación se desarrolla el estudio de tres propiedades importantes en la determinación de la calidad de la madera para usos específicos, estas son la Densidad Básica, el Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR).

El presente estudio pretende determinar los patrones de variación radial de dichas propiedades dentro del árbol en función de la edad, en 30 individuos de *Eucalyptus grandis*. Los ensayos se realizaron en pequeñas probetas libres de defectos en máquina universal marca Amsler bajo la norma AFNOR NF B 51 – 008 para la determinación del MOE y MOR y bajo la norma UNIT 237-1970 para determinación de la Densidad.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.

- Determinar el mejor lugar para muestrear las propiedades bajo estudio dentro de la troza de *E. grandis*.
- Buscar correlaciones entre las distintas propiedades y ajustar modelos que predigan unas a partir de otras.
- Determinar la utilidad del instrumento FAKOPP como método no destructivo y rápido en la estimación del MOE en árboles en pie.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA.

2.1.1. Generalidades.

Como material proveniente de seres vivos, la madera es muy variable y las fuentes de variación se dan a nivel celular, en la composición química y en sus características ultraestructurales y microscópicas. Hay también una variación importante a niveles superiores de organización, no solo entre especies sino también entre árboles dentro de una especie y aun dentro de un mismo árbol (Mantero, 2001).

Las propiedades de resistencia de estas maderas están fuertemente asociadas al PEA. La madera de árboles provenientes de plantaciones, tiene menores PEA que la de árboles maduros y a menudo sobremaduros crecidos en su lugar de origen y por consiguiente las propiedades asociadas también son menores. Estas diferencias se basan principalmente en una proporción mayor de leño juvenil en los árboles cultivados en rotaciones cortas que en los indígenas (Hillis, 1984).

Separando los conceptos de propiedades físicas y mecánicas de la madera, podemos expresar en detalle que (Coronel, 1994):

- Las propiedades físicas de la madera, son las que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural, sin que este actúe química o mecánicamente en su estructura interna.
- Mientras que las propiedades mecánicas son las que indican el comportamiento, cuando sobre la madera actúan cargas o sollicitaciones exteriores, principalmente a las deformaciones.

El estudio de estas propiedades es fundamental para la caracterización de las diferentes maderas, con la finalidad de:

- Efectuar comparaciones entre las mismas.
- Establecer la correcta resistencia de las maderas.
- Permitir determinar calidad de las mismas.
- Estudiar la influencia de distintos factores (sitio, especie, tasa de crecimiento, etc.) sobre las mismas.

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS.

Las propiedades físicas de la madera tienen por objetivo el estudio de las características y leyes que rigen los fenómenos en el interior de la madera y que no modifican la estructura íntima de la misma.

2.2.1. Factores que afectan las propiedades físicas de la madera.

Las propiedades físicas dependen fundamentalmente de los siguientes factores (Coronel, 1994):

- La disposición y orientación de los materiales, que forman las paredes celulares.
- La cantidad de sustancia básica que forma las paredes celulares de la madera.
- Los porcentajes de sustancias estructurales o de material celulósico que contiene el leño.
- La composición química de las sustancias básicas, que explica muchas diferencias cuantitativas en el comportamiento de la madera.
- El contenido de agua que se encuentre presente.

2.2.2. Peso específico y densidad de la madera.

2.2.2.1. Características generales.

No hay duda de que el peso específico o densidad de la madera es, con mucho, la característica de la madera más importante dentro de las especies para casi todos los productos (Barefoot et al., Einspahr et al., citados por Zobel y Talbert, 1988).

Se debe distinguir el peso específico aparente del peso específico de la madera. El primero hace referencia a la relación entre el peso y el volumen de la madera con poros, mientras que el peso específico considera solamente la relación entre el peso de la madera y su volumen sólido. Este último es relativamente constante entre especies, con un valor promedio de $1,53 \text{ g cm}^{-3}$, variando en función de las proporciones de lignina y celulosa (Tuset y Duran, 1979).

El peso específico aparente es extraordinariamente variable ya que depende no solo de la estructura misma de la madera, sino también del contenido de humedad de la muestra, la cual influye sobre el peso y el volumen. Esto implica que al comparar valores de peso específico aparente sea necesario indicar la humedad a la cual ese valor fue determinado (Coronel, 1994).

Entre las diversas formas de expresión del peso específico aparente, se distinguen principalmente (Coronel, 1994):

- a) Peso específico aparente al 12% de humedad. Corresponde a condiciones climáticas normalizadas a 20° de temperatura y 65% de humedad relativa del aire.
- b) Peso específico aparente al 15% de humedad. Corresponde al estado de la madera seca al aire.
- c) Peso específico aparente al 0% de humedad, llamado corrientemente peso específico aparente anhidro.

- d) Peso específico aparente básico. Definido como la relación entre el peso anhidro y el volumen verde de la muestra.

Esta última forma de expresión se utiliza frecuentemente en estudios teóricos y comparaciones, debido a la posibilidad de determinar un valor fácilmente reproducible, seguro e invariable.

Si bien la Norma utilizada en este estudio (UNIT 237-1970) hace referencia al método de determinación de peso específico aparente básico, en adelante se utilizara el término densidad básica en referencia al anterior. Esto responde a un acercamiento a la terminología utilizada internacionalmente. Por lo tanto la densidad básica es igual al peso específico aparente básico.

Dada su importancia y facilidad de determinación frente a otros parámetros de calidad, la densidad básica se ha convertido en la característica mas estudiada y difundida para la caracterización cualitativa de las distintas especies forestales (Downes et al., Ribeiro et al., citados por Achugar y Scaglione, 2003).

La densidad básica se usa comúnmente como indicador de varias características mecánicas y posibles usos potenciales de las maderas (Hans et al., 1972).

Las propiedades mecánicas como Módulo de elasticidad (MOE), Módulo de Rotura (MOR), y compresión paralela y perpendicular al grano, se incrementan al aumentar la densidad de la madera (Haygreen y Bawyer, citados por Fernández, 2004).

La variabilidad de la densidad dentro y entre especies, es debido a las distintas proporciones de sustancias leñosas y materiales extraños por unidad de volumen. La cantidad de sustancia leñosa está determinada en gran parte por las características estructurales de la madera, tales como tamaño y proporción de los distintos tipos celulares, y por el espesor de las paredes celulares, siendo esta última la de mayor efecto en la densidad (Brown et al., citados por Buzzo et al., 1997).

2.2.2.2. Valores característicos.

Pérez del Castillo (2001), reporta valores de densidad para pequeñas probetas libres de defectos de *Eucalyptus grandis* de $0,550 \text{ g cm}^{-3}$.

Piter (2003), trabajando en tablas de tamaño estructural de *Eucalyptus grandis* obtuvo valores de densidad que oscilaban entre 513 kg m^{-3} y 567 kg m^{-3} .

O'Neill et al. (2002) reportan valores medios de densidad corriente para pequeñas probetas libres de defectos de *Pinus elliottii* Eng. de $0,394 \text{ g cm}^{-3}$.

Fernández (2004) encontró una densidad media de $0,368 \text{ g cm}^{-3}$ para *Eucalyptus grandis* de 2 y 3 años de edad del departamento de Rivera.

Böthig (2001) que también trabajo con *Eucalyptus grandis* del departamento de rivera pero con una edad de 13,5 años, encontró con un 95% de confianza una densidad promedio de la madera de $0,463 \text{ g cm}^{-3}$.

Doldan (2003) encontró para *E. grandis* de 18 años de edad del departamento de Río Negro una densidad media de $0,43 \text{ g cm}^{-3}$. Medidas con probetas al 12% de humedad.

2.2.2.3. Variación dentro del árbol.

Radial.

La variación de la densidad básica se ha estudiado en numerosos trabajos de investigación. El patrón general de variación observado consiste en incrementos desde la médula hacia la corteza. En algunos casos se han reportado decrecimientos iniciales y un posterior incremento hasta la corteza.

Los patrones de comportamiento observados se pueden separar en los siguientes grupos:

- Incrementos desde la médula hacia la corteza.
- Decrecimiento inicial seguido de un incremento hacia la corteza.
- Decrecimiento hacia la corteza.

El comportamiento más frecuentemente encontrado en la bibliografía es el incremento desde la médula hacia la corteza. Brasil y Ferreira en árboles de 16 años de edad y Brasil et al., citados por Gaiotto (1988), Malan (1988) en árboles de 27 años, Malan y Hoon (1992) en árboles de 34 años de edad, reportan estos resultados.

Resultados similares se obtuvieron en estudios sobre árboles de menor edad. Hans et al. en árboles de 7 años, Hans en árboles de 5 años, Tomazello Filho en árboles de 10 años, Wilkins en árboles de 11 años de edad, y Lima et al. en clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 8 años de edad, citados por Achugar y Scaglione (2003).

Chapola y Ngulube (1990) señalan que el valor de la densidad es menor en la proximidad de la médula, aumentando hacia la corteza, aunque encontraron casos de comportamientos diferentes, decreciendo desde la zona interna y media hacia la exterior.

Centurión y Llano (1995) no encontraron un claro patrón de comportamiento para la variación de la densidad en el radio. El 57% de los árboles no se ajustó a ninguno de los modelos propuestos. De los restantes, la mitad mostró un comportamiento lineal donde la densidad aumenta desde la médula hacia la corteza. Obtuvieron también una respuesta cuadrática para otro grupo de árboles, en donde la densidad desciende desde la médula hasta un mínimo y luego aumenta hacia la corteza.

Longitudinal.

La mayoría de los resultados publicados indican que existe un incremento en la densidad con el incremento en altura, en ocasiones acompañado de una reducción inicial. El valor mínimo de densidad generalmente ocurre en el primer punto de muestreo sobre la base del árbol. En muestreos realizados cada 10% de altura del árbol, Manfredi, citado por Downes et al. (1997), encontraron que el mínimo de densidad se encontraba al 10% de la altura. Cuando el muestreo se realizó cada 25% de la altura (Bhat et al. 1990, Wilkins 1990), la densidad mínima fue reportada en el 25% de la altura.

Teniendo presente lo antes dicho Downes et al. (1997) afirman que la localización de la mínima densidad dependerá de la intensidad de muestreo y de este modo no podrá ser identificada con precisión si la base del árbol no se muestrea de manera intensiva.

Entre los muchos resultados publicados se pueden distinguir cuatro patrones de variación:

- Aumento de la densidad con la altura.
- Disminución de la densidad con la altura.
- Disminución inicial seguida de un posterior incremento en altura.
- Sin patrón definido.

Muchos autores señalan el 25% de la altura total como la zona de menor densidad básica del árbol, Rezende et al. (1998) en árboles de 8 años de edad, Bhat et al. (1990) en árboles con edades comprendidas entre 3 y 9 años, Wilkins (1990) en árboles de 11,3 años de edad, y Wilkins y Horne (1991) en árboles de 9,5 años. En árboles de 7 años de edad, De Souza et al., citados por Achugar y Scaglione (2003), obtuvieron los valores más bajos de densidad básica al DAP y 25% de la altura comercial.

Contrariamente, los resultados obtenidos por Chapola y Ngulube (1990) estudiando árboles de entre 5 y 9 años de edad, no encontraron ningún patrón

claro de variación para la densidad básica por encima de la mitad de la altura del árbol.

Centurión y Llano (1995), en un estudio comparativo de 68 árboles de *Eucalyptus grandis* a los 12 años de edad creciendo en el mismo sitio, no encontraron un modelo que explicara el comportamiento de la densidad básica con la altura desde la base hasta los 6,3 m de altura. Un 54% de los árboles no se ajustó a ningún modelo de regresión, mientras que el restante 46% lo hizo a modelos cúbicos o cuadráticos. De los árboles que se ajustaron a algún modelo, un 50% mostró un descenso de la densidad desde la base del árbol hasta los 3,5 m, para luego aumentar gradualmente hacia la copa. Otros árboles mostraron un aumento desde la base hasta 1,2 m, luego una disminución hasta los 4,2 m para aumentar finalmente hacia la copa.

2.2.2.4. Variación entre árboles (variación genética).

Una de las más importantes fuentes de variación en la densidad básica se da entre árboles, en respuesta a factores tanto genéticos como ambientales (Downes et al., 1997).

De Souza et al. (1986), trabajando con árboles de 7 años de edad de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, obtuvieron una alta heterogeneidad entre procedencias y dentro de las mismas para las dos especies, destacando que es superior la variabilidad entre procedencias que entre especies.

Hans (1974), estudiando híbridos artificiales de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus tereticornis* obtuvo diferencias significativas entre familias. Por otra parte la variación más significativa se encuentra entre árboles dentro de una misma familia.

Marcó y López (1995), observaron claramente ganancias genéticas en programas de mejoramiento, seleccionando entre otras características para aumentar la densidad básica, tanto para *E. grandis* como para *E. dunnii*.

Xavier et al. (1997) en un estudio de 40 progenies de medios hermanos seleccionadas de 75 familias, encontraron diferencias significativas entre las

progenies y señala a la densidad básica como una característica sobre la cual pesa un alto grado de control genético.

2.2.2.5. Variación con la edad.

Bertolucci y Penchel, citados por Achugar y Scaglione (2003), iniciaron investigaciones de selección precoz para determinar la edad mínima en que los mejores clones podrían ser seleccionados, debido a la diferencia de edad entre los ensayos y la edad de corta final. A partir de los resultados obtenidos concluyeron que los mejores clones identificados a los 2 años mantenían su superioridad a los 7 años.

Taylor (1984), comparando 20 árboles de entre 15 y 20 años de edad concluye que existe una fuerte correlación entre la densidad básica de la madera juvenil y la de la madera de mayor madurez, formada hacia las zonas más externas del fuste.

Trugilho et al. (1996), comparando materiales de *E. grandis* de 12, 24, 36 y 48 meses de edad, observaron que si bien la densidad aumenta con la edad, muestra una clara tendencia a la estabilización o reducción de la tasa de incremento hacia las edades mayores. Este efecto estaría explicado según los autores, por la aproximación a las edades de producción de madera adulta, donde las características de la madera se hacen más estables.

Bhat et al. (1990) comparando *E. grandis* de 3, 5, 7 y 9 años de edad, obtuvieron que la densidad básica variaba entre 0,42 y 0,497 g cm⁻³ para las cuatro edades analizadas. La menor densidad básica se obtuvo en los árboles de 5 años de edad, no existiendo diferencias significativas entre las densidades promedio para las demás edades. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Ladrach, citado por Bhat et al. (1990), quien concluye que la densidad básica no varía entre los 4 y los 7 años de edad en *E. grandis* plantados en Colombia.

Backman y García de León (2003), mencionan en su trabajo que para las especies *E. grandi*, *E. saligna*, y *E. dunnii* la densidad básica aumentó en un 11% con la edad (de los 4 a 9 años). Esto debe considerarse cuando se trata de predecir dicho parámetro en árboles a turno final, con bases de datos de árboles más jóvenes (mitad de turno).

2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS.

Junto con las propiedades físicas, la determinación de las propiedades de resistencia mecánica permite determinar los posibles usos a que puede ser destinada una madera.

Para determinar esto es necesario seguir los siguientes pasos (Tuset y Duran, 1979):

- Ensayo de pequeñas probetas libres de defectos (agregar piezas de tamaño de obra y madera puesta en servicio).
- Determinación de los esfuerzos unitarios en las propiedades mecánicas consideradas.
- Determinación de los esfuerzos básicos de proyecto.
- Determinación de los esfuerzos de proyecto.

A continuación se definen algunos conceptos de importancia para la mejor comprensión del tema:

Resistencia: capacidad de la madera de resistir u oponerse a fuerzas externas que actúan sobre ella tendiendo a cambiar su tamaño o forma.

Carga: fuerza distribuida que actúa sobre un cuerpo.

Esfuerzo unitario: es el esfuerzo por unidad de superficie a que fue sometido un cuerpo.

Deformación: es el cambio tanto en tamaño como en forma que sufre un material como consecuencia de la aplicación de cargas o fuerzas externas.

Elasticidad: capacidad que posee la madera de recuperar su tamaño o forma luego que deja de actuar la causa que dio origen a la deformación.

Rigidez: capacidad de una madera de oponerse a la flexión.

Límite de elasticidad o límite proporcional: límite dentro del cual la madera se comporta como material elástico. Mas allá de ese límite, la madera no recupera parte de la deformación al cesar la causa que la provocó.

Carga en el límite proporcional: valor de la carga correspondiente al límite proporcional.

Carga de rotura: valor de la carga que provoca la rotura de la madera ensayada.

Módulo de elasticidad (MOE): es la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud, constituyendo una medida de la rigidez o flexibilidad de una madera. Cuanto mas alto sea su valor mayor será su rigidez.

$$\text{MOE (MPa)} = P_p \cdot l^3 / 4 \cdot y \cdot b \cdot h^3; \text{ donde}$$

Módulo de rotura (MOR): es el esfuerzo unitario máximo provocado en una probeta de madera en el momento de su rotura.

$$\text{MOR (MPa)} = 3 \cdot P \cdot l / 2 \cdot b \cdot h^2; \text{ donde}$$

P = carga máxima soportada por la probeta, en Kg.

l = luz entre apoyos, en cm.

b = ancho de la probeta, en cm.

h = altura de la probeta, en cm.

P_p = carga en el límite proporcional, en Kg.

y = valor de la deformación en el límite proporcional, en Kg.

2.3.1. Factores que afectan las propiedades mecánicas de la madera.

Según Kollmann y Cote (1968), las propiedades mecánicas de la madera son fuertemente influenciadas por diversos factores, como la edad de los árboles, ángulo de grano, tenor de humedad, temperatura, constituyentes químicos, masa específica, estructura anatómica, duración de la tensión y la deformación, fallas en la madera, presencia de nudos y otros defectos.

2.3.1.1. Tipo de madera (Juvenil/Adulta).

En general la madera juvenil se forma alrededor de la médula y se localiza todo a lo largo del fuste. Esta se define como el material formado desde la médula hasta un anillo determinado, que según la especie, puede variar entre el 5º y 20º anillo.

La madera juvenil presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas respecto de la madera adulta.

La madera juvenil presenta características particulares como ser, menor espesor de pared celular, lo que lleva a un menor peso específico aparente; fibras más cortas; mayor ángulo microfibrilar con lo cual la resistencia a la flexión de esta madera será menor; las contracciones radiales y tangenciales son mayores que para la madera adulta, mientras que la longitudinal es mayor y también presenta una mayor tendencia al alabeo durante el secado. La madera juvenil, presenta menor resistencia y rigidez, mayores tensiones de contracción y expansión que la madera adulta (Coronel, 1994).

La madera juvenil brinda en general menores valores de resistencia y rigidez. Como consecuencia de la conformación que adquiere la importante capa intermedia de la pared secundaria en la estructura celular (Hunt, citado por Calvo et al., 2004).

En madera libre de defectos (clear), las propiedades que influyen en el comportamiento mecánico son: ángulo microfibrilar, longitud de fibras, densidad, porcentaje de leño tardío, espesor de la pared celular y diámetro del lumen celular. La madera juvenil tiene un ángulo microfibrilar alto (ángulo

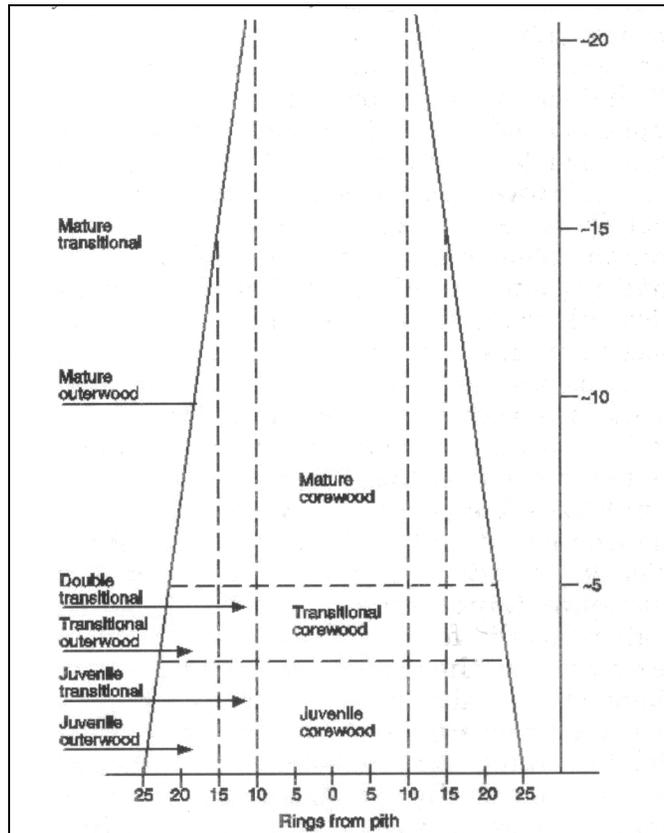
microfibrilar significa el ángulo que forman las microfibrillas de celulosa con respecto al eje longitudinal de la fibrilla elemental, generalmente medido en la pared celular secundaria S2), lo que puede producir una contracción longitudinal 10 veces mayor que en la madera adulta normal (Pérez del Castillo, 2000).

Según Walker y Woollons (1997), el ángulo microfibrilar es la característica fundamental que determina las propiedades de la madera, y reportan que este varía en función del número y de la altura del árbol. Cuanto mayor es este ángulo menor serán las propiedades mecánicas de la madera.

Con referencia a las propiedades microscópicas de los *Eucalyptus*, y en particular de la especie *grandis*, Hillis (1978) señala que la distancia a la médula tiene mayor influencia que la altura en el árbol sobre la longitud de las fibras. También señala que el diámetro de las mismas se incrementa desde el centro de crecimiento hacia la periferia del tronco. Informa también que el espiralamiento de las fibras se incrementa a una cierta distancia de la médula pero luego decrece hacia los extremos del tronco.

Burdon et al. (2004) redefinen la madera juvenil como la madera cerca del nivel del suelo de árboles plantados de semilla, independientemente del número de anillos desde la médula. Y propone una nueva clasificación de doble sentido para la madera juvenil de *Pinus taeda* y *P. radiata* según la cual existe una progresión vertical desde madera juvenil (juvenile corewood) a madura (mature corewood) hasta aproximadamente 5 m de altura y una progresión radial desde corewood (madera cercana a la médula) hasta outerwood (madera próxima a la corteza). Las diferencias verticales en propiedades de la madera, anillo por anillo desde la médula, ocurren junto con la variación vertical en el hábito de rama y por lo tanto en características de nudo.

De esta manera, mientras las mayores variaciones verticales en las propiedades promedio de la madera resultan simplemente de los anillos decrecientes desde la médula, existen variaciones verticales adicionales.



Fuente: extraído de Burdon et al. (2004).

Figura 1. Tallo de *P. radiata* según una nueva clasificación de zonas de madera.

Las consideraciones individuales en el tallo, a igual número de anillos desde la médula, son:

- El ángulo microfibrilar disminuye marcadamente, lo que produce un mayor aumento en la rigidez (MOE) y menores alabeos durante el secado.
- Con la disminución del ángulo microfibrilar y la menor propensión a formar madera de compresión, hay menos contracción longitudinal, lo que contribuye a una menor distorsión durante el secado y mayor estabilidad del mismo.
- El grano espiralado aumenta marcadamente, aumentando la torcedura inmediatamente después del secado.
- La susceptibilidad al agrietado interno de los anillos, en la zona de la albura, disminuye.

Las Primeras cuatro de estas tendencias no son sólo de interés académico; todas ellas implican propiedades que a menudo con severidad limitan la calidad y el valor de madera de *P. radiata*.

La parte inferior del extremo del fuste, con estas propiedades de madera distintivas, puede ser limitada en el grado. Sin embargo, esto implica una parte muy importante del tallo, con respeto tanto a su volumen como a su posición estratégica (Burdon et al., 2004).

2.3.1.2. Densidad.

Rogério et al. (2003) encontraron que entre las propiedades físicas de la madera, la densidad básica fue la única que presentó correlación estadística alta con las propiedades mecánicas. Este nivel de correlación indica que la densidad básica puede ser utilizada para estimar la resistencia mecánica de las maderas con potencial de uso estructural, de forma más rápida y precisa.

Bodig y Jayne (1982) afirman que muchas de las propiedades mecánicas están correlacionadas con la densidad.

Hellmeister (1982) relacionó la densidad con propiedades de resistencia y rigidez de maderas. El mismo autor (Hellmeister, 1983) afirma que existe una relación lineal entre la resistencia de compresión paralela a las fibras y la densidad, para la especie Pino Paraná.

Estudios presentados por Tanaami (1986), Melo y Siqueira (1992), Cordovil y Almeida (1995) indican que existe una relación lineal entre la densidad y la resistencia en ensayos convencionales de flexión estática.

2.3.1.3. Defectos.

Los defectos más importantes para el uso estructural de la madera que influyen sobre sus propiedades de resistencia y rigidez, provienen tanto de las condiciones de crecimiento del árbol, como del proceso de producción de la madera aserrada. Las mas significativas debidas al crecimiento son la presencia de nudos y la desviación de las fibras (Tuset y Duran, 1979).

Cuando la fibras no corren paralelas al canto de las piezas existen fibras inclinadas, que al ser solicitadas por esfuerzos de tracción o compresión tendrán componentes actuando perpendicularmente a las fibras que disminuyen la resistencia de la madera. La inclinación de las fibras puede tener dos causas principales: una la inclinación constante y que sigue la forma de espiral según la dirección longitudinal del fuste o por piezas que por su mal aserrado presentan este defecto (Coronel, 1994).

La presencia de anomalías ligadas al crecimiento, como los nudos y la desviación de las fibras, las originadas en los procesos de secado y producción, como las fisuras y los ataques biológicos, entre otros, afectan las propiedades mecánicas en general, pero en algunos casos con distinto nivel de importancia. La presencia de nudos tiene mayor influencia en las zonas sometidas a tracción que a compresión (Glos y Lederer, citados por Piter, 2003).

Numerosas investigaciones reportan una importante disminución de las propiedades mecánicas por efecto de la nudosidad expresada de acuerdo a distintos criterios. Elevados coeficientes de correlación negativos entre ambas variables han sido encontrados para madera aserrada de especies frondosas (Glos y Lederer, citados por Piter, 2003) como de confieras (Hermoso Prieto, 2001).

Piter (2003), reporta una relativamente pobre correlación entre la nudosidad, expresada con relación al lado en el que se manifiesta el nudo y el MOR para todos los cuerpos de prueba ensayados.

La zona central del tronco, conteniendo médula o el material adyacente a ella, se caracteriza por poseer propiedades de resistencia y rigidez de menor calidad en los *Eucalyptus* y otras especies frondosas, debido fundamentalmente a la presencia de pequeñas fisuras en las paredes de las células, entre otras causas (Hillis, 1978).

El corazón quebradizo es una imperfección que ocurre en la zona central del tronco, alrededor de la médula. Aparentemente se debe a efectos de fuerzas de compresión ejercidas sobre esa zona por tensiones de crecimiento o por efecto del viento o por ambos. La madera de esta zona es quebradiza y de baja resistencia mecánica (Hillis, 1978).

2.3.1.4. Variación con la edad.

Según Zobel y Jett (1995), existen controversias con relación a la influencia de la edad de los árboles sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

De Castro Silva et al. (2005), trabajando con árboles de 4 edades diferentes (10, 14, 20 y 25 años) verificaron que el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) se muestran positivamente correlacionados con la edad de los mismos. Los mayores valores de MOE y MOR fueron encontrados en árboles de mayor edad.

2.3.2. Módulo de elasticidad (MOE).

2.3.2.1. Características generales.

El módulo elástico mide la capacidad de un material de recuperar su forma luego de ser sometido a un esfuerzo. La definición académica define al módulo de elasticidad como la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud, lo cual constituye una medida de flexibilidad del material. Esta propiedad, al igual que las otras, se encuentra también afectada por la anisotropía de la madera. Por lo tanto esta propiedad tendrá una magnitud diferente según la dirección en que esta se mida (Coronel, 1994).

2.3.2.2. Valores característicos.

INTA (1995) informa resultados referidos a pruebas realizadas en pequeñas probetas libres de defectos, conforme a la norma ASTM D 143, en flexión estática, con madera secada naturalmente, obteniendo valores de MOE de 9835 N mm⁻² y en estado verde 6919 N mm⁻².

Trabajos realizados sobre 52 pequeñas probetas libres de defectos, obtenidas de 10 árboles de *E. grandis* de la localidad de Rivera, ensayadas en máquina universal, arrojaron valores máximos de 15903 MPa, mínimos de 8232 MPa y una media aritmética de 11338 MPa (Pérez del Castillo, 2001).

Rogério et al. (2003) encontraron valores de MOE de 15044 MPa. Este resultado fue superior al encontrado por Lima et al. (2000), en clones de *Eucalyptus*, que fue de 9754 MPa.

Pérez del Castillo (2001), en ensayos realizados sobre tablas de *E. grandis* en tamaño estructural, conforme a la norma ASTM D 198, libres de médula y con un contenido de humedad de 12%, reportan valores de MOE que oscilan entre 11200 N mm⁻² y 12600 N mm⁻². Utilizando la misma madera, se ensayaron pequeñas probetas libres de defectos, de las cuales se obtuvieron valores de 11300 N mm⁻² para MOE.

De Castro Silva et al. (2005), trabajando con 16 árboles de diferentes edades (10, 14, 20 y 25 años) reportan valores medios para el Módulo de Elasticidad (MOE) de 129230 Kgf cm⁻², siendo los límites inferiores y superiores, respectivamente, 81438 Kgf cm⁻² (para árboles de 10 años de edad y en la posición mas próxima a la médula) y 19268 Kgf cm⁻² (para árboles de 20 años de edad en la posición mas cercana a la corteza).

2.3.2.3. Variación dentro del árbol.

Radial.

La zona central del tronco, conteniendo médula o el material adyacente a ella, se caracteriza por poseer propiedades de resistencia y rigidez de menor calidad en los *Eucalyptus* y otras especies frondosas, debido fundamentalmente a la presencia de pequeñas fisuras en las paredes de las células, entre otras causas (Hillis, 1978).

Rogério et al. (2003), trabajando con híbridos de *Eucalyptus* encontraron para la troza 1, que la posición intermedia presenta un MOE (f) 11,4% superior a la posición central. La posición externa, muestra un aumento de 16,9% con relación a la posición intermedia. En la troza 2, la posición externa tiene un MOE (f) 16% mayor que la posición central.

Pérez Del Castillo (2003), trabajando con 10 árboles de *Eucalyptus grandis* encontraron que las tablas mas alejadas de la médula presentaron un MOE promedio mayor y un coeficiente de variación menor que las tablas mas cercanas a la médula.

O'Neill et al. (2002) trabajando sobre pequeñas probetas libre de defectos de *Pinus elliotii* Eng., encontraron una tendencia muy clara en el comportamiento de la variación radial de las propiedades mecánica. Encontrando un leve incremento para el MOE entre la probeta A (cercana a la médula) y la B (intermedia), y un aumento mas marcado desde ésta a la C (cercana a la corteza).

O'Neill et al. (2004) en pequeñas probetas libres de defectos de *Pinus taeda* L., encontraron para el MOE un valor de la probeta C (cercana a la corteza) dos veces superior que la probeta A (cercana a la médula).

Piter (2003) trabajando con tablas de tamaño estructural de *E. grandis* reporta valores medios de MOE correspondientes a tablas libres de médula un 17% (13353 N mm^{-2}) superiores a los medios de los de las tablas que poseen médula (11374 N mm^{-2}). El MOE en flexión exhibe valores ascendentes cuando crece la distancia al centro.

De Castro Silva et al. (2005) observaron un aumento en los valores medios del Módulo de Elasticidad (MOE) en razón de la edad y la dirección radial, en el sentido de médula a corteza.

Longitudinal.

El análisis de varianza del MOE entre clones y entre trozas muestra que las diferencias de MOE entre trozas son estadísticamente significativas al 1% de probabilidad, Rogério et al. (2003).

Moura (2000) estudiando 10 clones de híbridos proveniente del noreste de Minas Gerais, verificó la existencia de diferencias estadísticas entre trozas para las características estudiadas (flexión estática y compresión paralela a las fibras) a lo largo del fuste, siendo que, de modo general, mayores valores fueron observados en las trozas superiores del tronco.

2.3.2.4. Variación entre árboles (variación genética).

Pérez Del Castillo (2003) trabajando con 10 árboles de *E. grandis* mediante la prueba t para dos muestras, observó diferencias significativas en los valores de MOE entre la mayoría de los casos analizados.

Sanchez Acosta (2003) trabajando con 5 poblaciones comerciales de *E. grandis* de 17 años de edad promedio, de tres orígenes distintos: huerto semillero sudafricano, origen kendall (Australia) y raza local (Concordia, Argentina), no encontró diferencias significativas para el MOE entre las 5 poblaciones en estudio.

2.3.3. Módulo de rotura (MOR).

2.3.3.1. Características generales.

Cuando sobre un cuerpo de madera, el esfuerzo sobrepasa el límite elástico, se producen perturbaciones en el interior de la estructura y se ponen de manifiesto procesos de escurrimiento de las sustancias que forman la estructura micelar de la madera o procesos visco-elásticos, que en primera instancia solo ocasionan una deformación no proporcional al esfuerzo. Una posterior elevación del esfuerzo estará en relación con la composición y las diferentes sustancias estructurales del interior de la madera, hasta que el cuerpo se rompe; llamándose este límite esfuerzo de rotura a la carga total aplicada.

2.3.3.2. Valores característicos.

INTA (1995) informa resultados referidos a pruebas realizadas en pequeñas probetas y libres de defectos, conforme a la norma ASTM D 143, en flexión estática, con madera secada naturalmente, obteniendo valores de MOR de 73,1 N mm⁻² y en estado verde 58,2 N mm⁻².

Pérez y Venturino (2003), encontraron en 52 pequeñas probetas libres de defectos ensayadas en máquina universal valores máximos de 102 MPa, mínimos de 42 MPa, y una media aritmética de 80 MPa.

Pérez Del Castillo (2001) en ensayos realizados sobre tablas de *E. grandis* de tamaño estructural, conforme a la norma ASTM D 198, libres de médula y con un contenido de humedad de 12%, reporta un valor de MOR de 54 N mm⁻². Utilizando la misma madera, se ensayaron pequeñas probetas libres de defectos, de las cuales se obtuvieron valores de MOR de 80,0 N mm⁻².

Rogério et al. (2003) encontraron un valor de MOR (f) medio entre clones de 94 MPa. Ese valor es similar al verificado por Lima et al. (2000), que fue de 90 MPa.

2.3.3.3. Variación dentro del árbol.

Radial.

Rogério et al. (2003) encontraron para la troza 1, que la posición intermedia presento un MOR 3,5% mayor con relación a la posición central. En la posición externa, se pudo notar un aumento de 10,2% con relación a la posición intermedia. En la troza 2, la posición externa tiene un MOR (f) 14,1% mayor que la posición central.

Pérez Del Castillo (2001) trabajando con 10 árboles de *E. grandis* encontró que las tablas C (más alejadas de la médula) presentaron un valor promedio de MOR mayor y un coeficiente de variación menor que las tablas más cercanas a la médula.

De Castro Silva et al. (2005) reportaron aumentos en los valores medios del Módulo de Rotura (MOR) en función de la edad y la dirección radial en el sentido médula-corteza.

Piter (2003), trabajando en tablas de tamaño estructural de *E. grandis* reporta valores medios de MOR de 43,8 N mm⁻² obtenidos en cuerpos de prueba libres de médula, estos valores son un 27% mayor que los correspondientes a los cuerpos de prueba que si la contienen (34,6 N mm⁻²).

En tablas de tamaño estructural, congruentemente con la influencia negativa que la presencia de médula y la nudosidad ejercen sobre la resistencia a flexión y tracción, Piter (2003) reporta incrementos de estas resistencias en la medida que las tablas ensayadas proceden de zonas mas distantes a la médula.

Longitudinal.

El análisis de varianza de MOR entre clones y trozas muestra que las diferencias de MOR entre trozas fueron significativas estadísticamente al nivel de 1% de probabilidad, Rogério et al. (2003).

2.3.3.4. Variación entre árboles (variación genética).

Pérez Del Castillo (2001) trabajando con 10 árboles de *E. grandis* mediante la prueba t para dos muestras, observó diferencias significativas en los valores de MOR entre la mayoría de los casos analizados.

2.4. CORRELACIONES ENTRE LAS DISTINTAS PROPIEDADES.

2.4.1. Correlación entre propiedades físicas y mecánicas.

Adorno y García (2003), trabajando con 15 clones de *E. urophylla* y 18 de *E. grandis* encontraron una correlación positiva y significativa entre la densidad básica y todas las propiedades mecánicas estudiadas en laboratorio. Botero, Hillis, Méndez, Sales, Nascimento, citados por Adorno y García (2003), muestran que cuanto mayor es el valor de la densidad básica, mayores valores de propiedades mecánicas se pueden esperar en la madera.

Pérez Del Castillo (2001) encontró un coeficiente de correlación de 0,624 entre Densidad y MOE, y un coeficiente de correlación de 0,825 entre Densidad y MOR.

Pérez Del Castillo et al. (2000), trabajando sobre madera de *Pinus taeda* L. encontraron una correlación entre la densidad y el MOE por el método de flexión estática (pesas) de 0,837.

2.4.2. Correlaciones entre distintos ensayos.

Pérez Del Castillo (2001), trabajando en *E. grandis*, encontró un coeficiente de correlación de 0,732 entre el MOE obtenido en ensayo de flexión estática en pequeñas probetas libres de defectos y el MOE de tablas obtenido en ensayo de flexión estática (luz 2520 mm). Para el MOR la correlación entre los valores de ambos ensayos fue de 0,362.

O'Neill et al. (2002), trabajando sobre madera de *Pinus elliottii* Eng., reportan cierta relación entre el MOE de las tablas y el MOE de las pequeñas probetas libres de defectos obtenidas de las mismas, el valor de la correlación presentado fue de 0,634. Para el MOR el valor para esa correlación fue de 0,313.

O'Neill et al. (2004), trabajando sobre madera de *Pinus taeda* L., encontraron cierta relación entre el MOE de tablas y el MOE de las probetas clear obtenidas de las mismas ($r=0,724$). Teniendo en cuenta esto y otros resultados publicados para Pino y *Eucalyptus* pudieron decir que el MOE es una propiedad que no está influenciada en gran medida por los nudos de las tablas sino que depende de las características de la madera. Para el MOR no se encontró correlación entre los valores de tablas y pequeñas probetas ($r=0,524$), esto se debe a que el MOR está más influenciado en forma negativa por la presencia de defectos de las tablas, como nudos, grano inclinado, etc.

2.4.3. Correlación entre métodos destructivos y no destructivos.

Pérez Del Castillo (2001) trabajando con árboles plus de *E. grandis* de 16,5 años de edad, reporta coeficientes de correlación de 0,92 y 0,97 entre el dato de Fakopp y las tablas (B y C respectivamente) ensayadas en máquina universal.

2.5. FAKOPP.

El equipo FAKOPP nos permite la evaluación de árboles vivos. Este equipo puede detectar los agujeros, defectos o grietas en árboles por una técnica no destructiva. FAKOPP mide el tiempo de propagación de la onda de tensión entre dos transductores (Fakopp Enterprise, 2006).

El nombre FAKOPP es una combinación de dos palabras húngaras: “fa” y “kopp”. Los significados son árbol y golpear (Fakopp Enterprise, 2006).

El material de madera de un árbol intacto es una buena guía sana mientras que una madera defectuosa es un amortiguador sano. La velocidad del sonido en un material de madera intacto es mucho más alta que en vacío o defectuosa. Ésta es la razón por la que el frente de la onda de tensión (impulso sano) evita los defectos en el árbol (Fakopp Enterprise, 2006).

Dos transductores definen una línea recta a lo largo de un árbol, onda de tensión, inducida golpeando ligeramente uno de los sensores. Se llama transductor de salida al transductor que se golpea ligeramente (Figura 2-a y 2-c) y transductor de llegada al opuesto (Figura 2-b).

Si la línea definida por los transductores intercepta un defecto el tiempo de propagación de onda aumenta. FAKOPP mide el tiempo de propagación de la onda de tensión entre dos transductores (Figura 2-d). El tiempo de propagación de onda es inversamente proporcional al MOE (Fakopp Enterprise, 2006).



a.



b.



c.



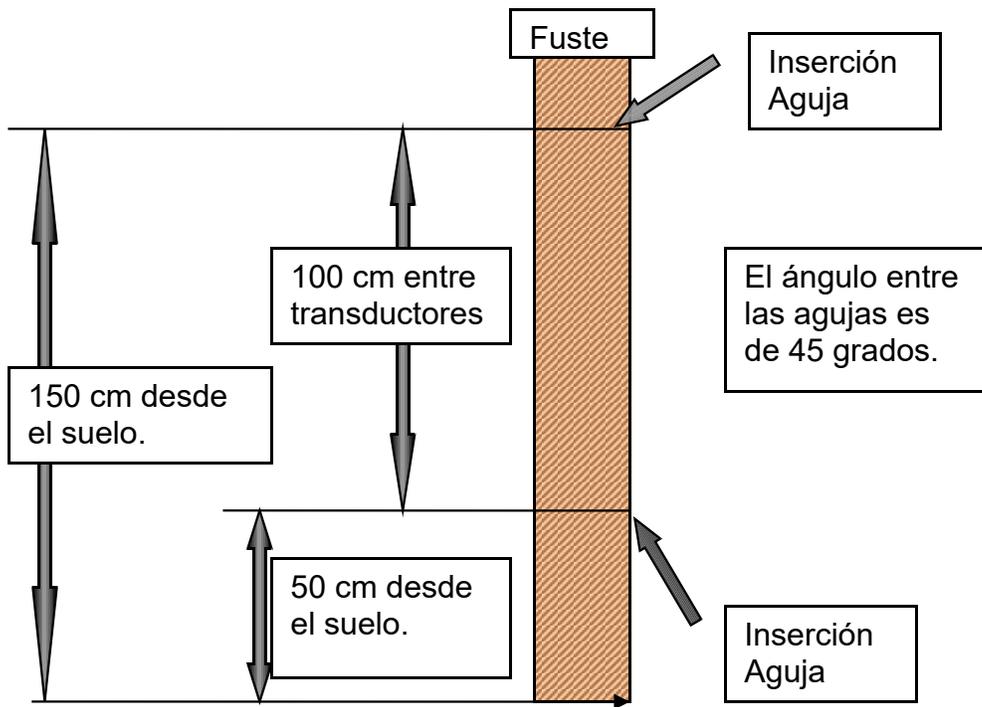
d.

Fuente: Fakopp Enterprise (2006).

Figura 2. Modo de uso del instrumento FAKOPP.

Esta técnica prueba el árbol solamente en la línea definida por los transductores. Si el defecto se localiza en otra sección del fuste puede suceder que los defectos existentes no sean detectados. Para evitar esta situación es recomendable probar el árbol en dos direcciones, opuestas una de la otra (Fakopp Enterprise, 2006).

El ángulo (a) entre el perno del transductor y la fibra tiene poco efecto en el tiempo de propagación de onda. Igualmente se recomienda 45 grados, pero se acepta hasta 60. Sobre 60 grados la lectura no es confiable. Es necesario también que la aguja penetre la corteza (Fakopp Enterprise, 2006).



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Esquema de utilización del equipo FAKOPP.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

El material experimental utilizado en esta investigación proviene de plantaciones comerciales de *E. grandis* Hill pertenecientes a la empresa COLONVADE S. A., situadas en distintas zonas del departamento de Rivera, Republica oriental del Uruguay.

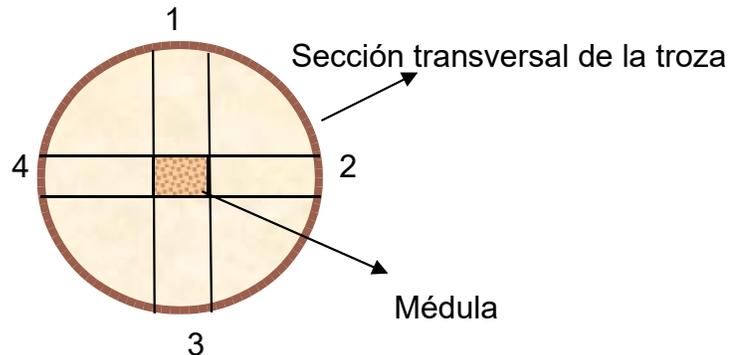
Para este estudio se utilizaron 30 árboles plus seleccionados a partir de características de crecimiento. Los mismos comprenden diferentes edades, 7, 8, 9, 12, 18, 19, 20 y 22 años.

Previo a la cosecha de estos, se tomaron datos de DAP (Diámetro a la Altura del Pecho) de cada uno y se estimó el MOE (Módulo de Elasticidad). Este último mediante la utilización de un método no destructivo, el equipo FAKOPP.

De cada individuo se utilizó una troza de 60 centímetros, para lo cual se tomó como referencia la altura al pecho (AP altura 1,30 m); 30 cm por encima y 30 cm por debajo del mismo.

3.1. PREPARACION DE PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS.

Las trozas fueron recibidas en el Departamento Forestal de la Facultad de Agronomía. Cada una de estas estaba perfectamente identificada según el árbol al cual pertenecía. En la carpintería de la misma Facultad se realizó el primer procesamiento, obteniendo mediante el uso de una sierra sin fin, 4 secciones radiales de 600 mm x 40 mm x radio (en las cuatro direcciones) de cada una de las mismas.



Fuente: elaboración propia.

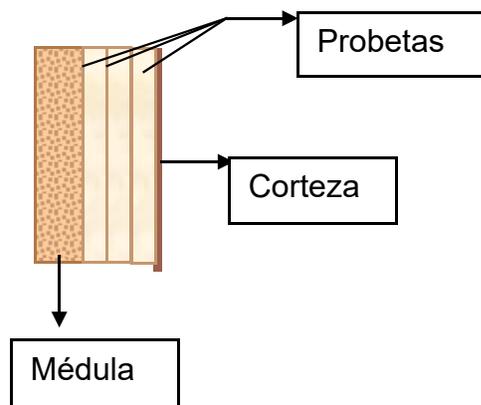
Figura 4. Esquema de corte de las trozas.

Estas secciones fueron debidamente identificadas según el árbol al cual pertenecían y se numeraron del 1 al 4, según la dirección a la cual correspondía.

Posteriormente, este material fue trasladado a una carpintería particular para obtener pequeñas probetas libres de defectos.

Obtención de las pequeñas probetas libres de defectos:

1. Se cepillaron ambas caras de cada sección hasta llegar a un espesor de aproximadamente 22 mm.
2. Luego se le extrajo la corteza y se realizó el escuadrado del lateral externo de cada pieza (sección).
3. Mediante la utilización de una pequeña máquina de aserrado provista de una cierra circular se obtuvieron listones de 600 mm de largo. El aserrado de las piezas (secciones) se realizó desde la zona externa (corteza) hacia la interna (médula), descartando la madera próxima a la misma.



Fuente: elaboración propia.

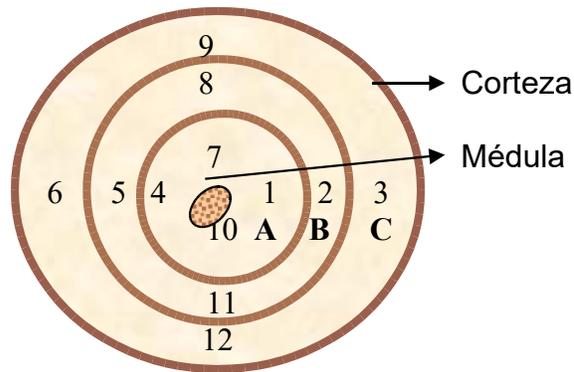
Figura 5. Obtención de las probetas libres de defectos.

4. Posteriormente se eligió de cada uno de estos listones de 600 mm x 22 mm x 22 mm una sección libre de defectos (nudos, rajaduras, etc.). De esta sección se extrajeron las probetas libres de defectos de las dimensiones exigidas en la Norma AFNOR B 51-008, 300 mm x 20 mm x 20mm.
5. Por último cada una de las probetas fue pulida en todas sus caras, en una lijadora de bandas, para que no hubieran diferencias en las dimensiones de las mismas mayor al 1%, exigencia de la norma antes dicha.

Cada una de estas probetas fue identificada antes de ser ingresada a la carpintería con un número que se correspondía con la sección, posición en el radio y código del árbol plus al cual pertenecía.

El número de probetas que se extrajo de cada árbol fue de aproximadamente 12, dependiendo de la mayor o menor presencia de defectos en el mismo, lo que implica mayor o menor cantidad de probetas descartadas (defectuosas).

A continuación se presenta en forma esquemática como se realizó la numeración de las probetas.



Aproximadamente 12 probetas

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Clasificación de probetas según posición y dirección en el radio.

Previo a la realización de las pruebas, las probetas fueron secadas naturalmente, en un espacio cubierto, hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio (aproximadamente 12%).

3.2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE) Y MÓDULO DE ROTURA (MOR).

3.2.1. Medición con FAKOPP (método no destructivo).

Los datos de Fakopp fueron proporcionados por la empresa COLONVADE S.A., los mismos se tomaron de los árboles en pie previo a la cosecha. El procedimiento para la obtención de estos fue el siguiente: se realizaron dos medidas en lados opuestos del fuste, en las direcciones Norte y Sur. Los sensores de salida y de llegada se colocaron a 1 m de distancia entre sí en la dirección longitudinal de fuste.

El dato de velocidad de propagación de onda que brinda el instrumento se aplicó a la siguiente fórmula y de esta forma se obtuvo el MOE estimado por este método no destructivo.

$$1/t\text{-sw} = (E_{t\text{-sw}} \cdot g/\rho)^{1/2}$$

Donde :

E_{t-sw} : MOE por propagación de onda de impacto.

t-sw: Tiempo de propagación de la onda por unidad de distancia recorrida.

g: Constante de aceleración gravitacional.

ρ : Densidad.

3.2.2. Medición con Máquina Universal (método destructivo).

Los ensayos de flexión estática para determinar el MOE y el MOR se realizaron en Máquina Universal AMSLER de 400 KN de capacidad máxima de carga, (en el laboratorio del instituto de ensayo de materiales de la Facultad de Ingeniería). Según lo indica la norma AFFNOR, las dimensiones de las probetas para este ensayo deben ser de 300 mm x 20 mm x 20 mm libres de defectos, en este caso se descartaron las que los presentaban. Estas se sometieron a un esfuerzo de flexión estática de tres puntos, con una separación entre apoyos de 24 cm. La carga se aplicó en dirección tangencial a los anillos de crecimiento (cara radial) y en el centro de la probeta, a una velocidad constante.

La Máquina Universal permite la lectura directa del MOR y proporciona una gráfica de deformación en función de la carga aplicada. A partir de esta gráfica y aplicando la fórmula que se presenta a continuación, se obtiene el dato de MOE.

La fórmula utilizada para el cálculo del MOE es la siguiente:

$MOE = P_p \cdot l^3 / 4 \cdot y \cdot b \cdot h^3$; donde

MOE: módulo elástico,

P_p : carga en el límite proporcional elástico,

l: distancia entre apoyos inferiores,

y: deformación en el límite proporcional elástico,

b: espesor de la probeta,

h: altura de probeta.



3.2.3. Determinación del Volumen y del Peso Específico Aparente Corriente.

Luego que las probetas fueran utilizadas en el ensayo mecánico de flexión estática, a partir de éstas, se confeccionaron nuevas probetas de 20mm x 20mm x 20mm, según la Norma UNIT 237-1970. La medición del volumen se realizó en el Volumenómetro de Breuill (inmersión de la pieza en mercurio).

Luego de obtenidas las probetas y debidamente identificadas, fueron selladas con parafina para poder realizar el cálculo de volumen. Este consistió, en sumergir la probeta en mercurio; siendo el volumen de la misma igual a la cantidad de mercurio desplazado.

Posterior a ésta medición fue retirada de forma cuidadosa la parafina de cada probeta y el mercurio que pudiera haber quedado en ellas.

En las instalaciones del Laboratorio de Ensayos Químicos de la Facultad de Ingeniería, se procedió a pesar cada una de las probetas a un contenido de humedad de equilibrio. Luego se acondicionaron y colocaron en una bandeja metálica para ser llevadas a estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante un tiempo de 24 horas. Inmediatamente después de ser retiradas de la estufa fueron colocadas en un deshumificador para impedir que recuperaran la humedad de equilibrio. Posteriormente fueron pesadas una a una en estado anhidro en balanza de precisión y aplicando la siguiente fórmula se obtuvo el dato de Densidad Básica (PEAB).

PEAB = Peso Anhidro (gr) / Volumen Verde (cm³)

3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Para procesar los datos obtenidos a partir de los experimentos realizados se utilizó el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System, 1996). Se realizaron análisis de varianza y pruebas de diferencia de medias para detectar diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de variación.

Se ajustaron modelos de regresión simples lineales, que permiten predecir ciertas variables a partir de otras. También se determinaron correlaciones entre las diferentes variables bajo estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, EL MÓDULO DE ROTURA Y LA DENSIDAD SEGÚN UBICACIÓN EN EL RADIO.

4.1.1. Densidad Básica.

Cuadro 1. Densidad básica media para todos los árboles según posición en el radio.

	DENSIDAD (g cm ⁻³)		
	A	B	C
n	82	100	100
MEDIA	0,459	0,484	0,514
DES. STD.	0,064	0,062	0,064
C.V. (%)	13,847	12,790	12,370

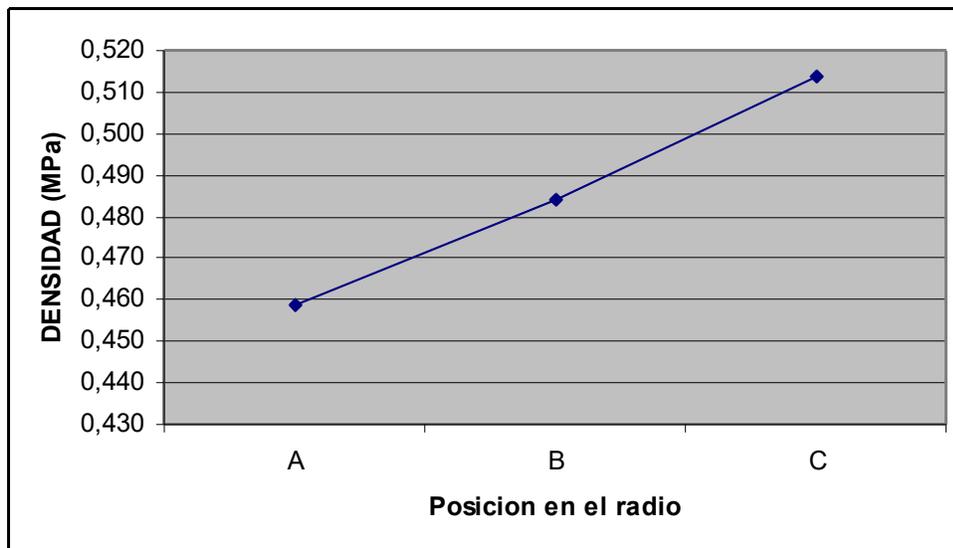


Figura 8. Comportamiento de la Densidad básica según posición en el radio.

En la figura 8; se puede observar que la densidad básica muestra una tendencia clara a aumentar desde la posición más cercana a la médula (probetas "A"), pasando por la zona central (probetas "B") y registrando los mayores valores en la posición más externa (probetas "C").

Estos datos coinciden con los reportados por Brasil y Ferreira (1979) en árboles de 16 años de edad, Brasil et al., citados por Gaiotto (1988), Malan (1988) en árboles de 27 años, y Malan y Hoon (1992) en árboles de 34 años de edad. Esto puede estar explicado por el hecho de que las probetas externas están compuestas de madera más adulta (más densa) que las internas (madera juvenil).

4.1.2. Módulo de Elasticidad (MOE).

Cuadro 2. MOE medio para todos los árboles según posición en el radio.

	MOE (MPa)		
	A	B	C
n	95	109	105
MEDIA	8381	8836	9082
DESV. STD.	1794	1882	2062
C.V. (%)	21	21	23

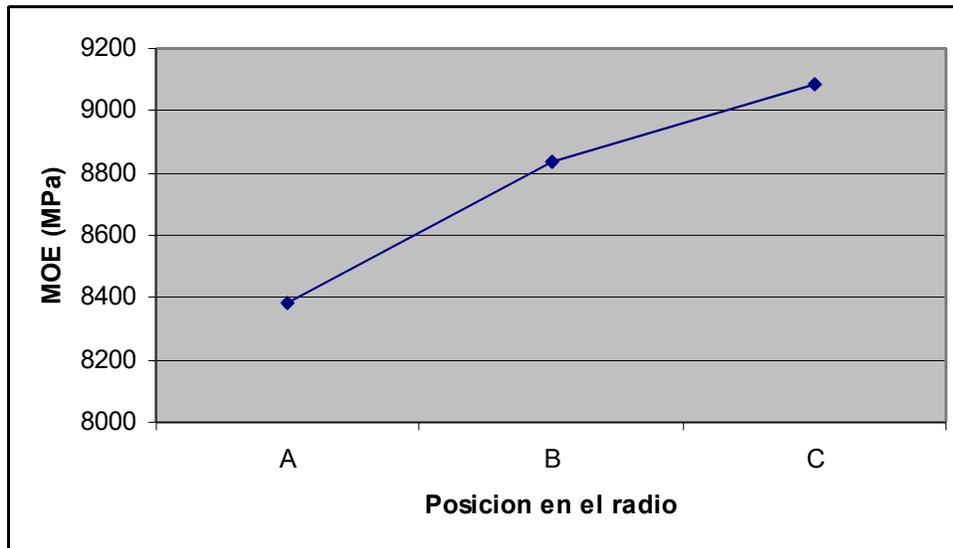


Figura 9. Comportamiento del MOE según la posición en el radio.

En la figura 9 vemos como la variación del módulo de elasticidad en el radio muestra una tendencia a aumentar a medida que las probetas se alejan de la médula, en la medida que éstas representan madera juvenil, de transición y adulta (al acercarse a la corteza) respectivamente.

Este es el patrón de comportamiento mas comúnmente encontrado en la bibliografía, Rogério et al. (2003), Pérez Del Castillo (2003), Piter (2003), De Castro Silva et al. (2005) reportan aumentos en los valores de MOE de médula a corteza, esto puede explicarse por el diferente comportamiento de la madera adulta y juvenil en cuanto a su comportamiento mecánico.

4.1.3. Módulo de Rotura (MOR).

Cuadro 3. MOR medio para todos los árboles según posición en el radio.

	MOR (MPa)		
	A	B	C
n	96	110	106
MEDIA	80	82	87
DESV. STD.	15	17	18
C.V. (%)	19	21	21

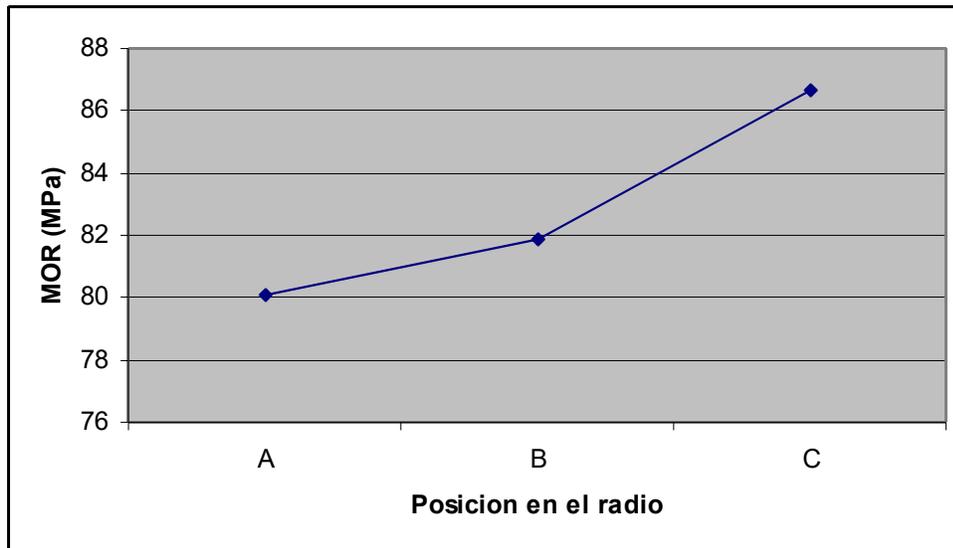


Figura 10. Comportamiento del MOR según posición en el radio.

En la figura 10 se puede observar un leve aumento entre las probetas A (más cercanas a la médula) y las B (intermedias), y un mayor aumento entre las probetas B y C (externas).

Estos resultados se acercan mucho a los encontrados por Rogério et al. (2003), que reportaron un valor de MOR de la probeta intermedia 3,5% mayor que la interna y un valor de MOR de la probeta externa 10,2% mayor que la intermedia.

Otros autores, Pérez Del Castillo (2001), Piter (2003), De Castro Silva et al. (2005), reportan incrementos desde médula a corteza para los valores de MOR, pero no marcan estas diferencias entre posiciones.

Las tres propiedades estudiadas (Densidad, MOE y MOR) se comportan de manera similar en cuanto a su variación en el radio, esto es, aumentan sus valores a medida que se alejan de la médula. No es posible asignar este comportamiento a todo el árbol debido a que se trabajó con muestras extraídas de la zona basal, altura no mayor a 1,50 m del suelo.

4.2. ANAVA Y COMPARACION DE MEDIAS.

Para analizar si la variación en el radio es significativa y poder realizar una comparación de medias, se llevaron todos los datos a la edad promedio de todos los árboles, 13,2 años.

Cuadro 4. Análisis de varianza.

Variable	F. de V.	G. L.	Error tipo IV	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
DENSIDAD	Posición	2	0,11306297	0,05653149	31,09	<0,0001
	Edad	1	0,52812808	0,52812808	290,44	<0,0001
MOE	Posición	2	23728489,7	11864244,8	3,74	0,0249
	Edad	1	228572169,0	228572169,0	72,15	<0,0001
MOR	Posición	2	2032,91062	1016,45531	3,98	0,0198
	Edad	1	11840,80648	11840,80648	46,34	<0,0001

Como se ve en los datos presentados existe variación significativa en el sentido radial para las tres variables bajo estudio Densidad básica, MOE y MOR.

Cuadro 5. Comparación de medias para las tres variables.

Variable	Distancia	Media	Error estándar	Pr > t
DENSIDAD	1	a 0,4568	+/- 0,0049	<0,0001
	2	b 0,4848	+/- 0,0044	<0,0001
	3	c 0,5096	+/- 0,0044	<0,0001
MOE	1	a 8338,7456	+/- 194,2043	<0,0001
	2	ab 8747,7255	+/- 178,8916	<0,0001
	3	bc 9067,8478	+/- 182,6219	<0,0001
MOR	1	a 79,6568	+/- 1,7338	<0,0001
	2	a 81,1210	+/- 1,6066	<0,0001
	3	b 86,0019	+/- 1,6400	<0,0001

En el caso de la Densidad la comparación de medias permite observar que existen diferencias significativas entre las tres posiciones, interna, media y externa. Para la variable MOE, existen diferencias significativas entre la posición 1 (interna) y la 3 (externa), no existe diferencias significativas entre las posiciones 1 y 2, y entre las posiciones 2 y 3. Por último, el MOR muestra diferencias significativas entre las posiciones 1 (interna) y la 3 (externa), y también entre la posición 2 (media) y la 3 (externa), no existen diferencias significativas entre las posiciones 1 y 2.

4.3. VARIANZAS.

4.3.1. Variación entre y dentro de la posición.

Con el siguiente análisis se pretende estudiar las varianzas, tanto para la posición como para las direcciones de las variables analizadas. Esto nos permitirá elegir la mejor posición para muestrear cada una de estas propiedades.

Cuadro 6. Estimadores de varianza según posición en el radio y direcciones.

		DENSIDAD		MOE *		MOR	
		Estimador de varianza	Error estándar	Estimador de varianza	Error estándar	Estimador de varianza	Error estándar
A	Entre Árboles	0,002606	0,00169	1,123197	0,47299 0	118,92	42,6874
	Entre direcciones dentro	0,006445	0,00122 1	1,211141	0,21086 6	57,6078	9,9925
B	Entre Árboles	0,001149	0,00067 3	1,409457	0,53103 2	166,29	56,7852
	Entre direcciones dentro del Árbol	0,003439	0,00056 8	11,447328	0,18065 2	63,3925	10,077
C	Entre Árboles	0,000121	0,00000 3	3,029931	1,22566 2	211,04	71,0529
	Entre direcciones dentro del Árbol	0,006229	0,00091 3	1,757754	0,29581 1	69,0509	11,2514

* Para poder realizar una lectura más ágil de los resultados, las varianzas del MOE fueron divididas entre 1000000.

En el cuadro 6 podemos observar que la menor variación se presenta para la variable DENSIDAD en la posición C. En cuanto a variación entre direcciones, la menor se presenta en la posición B.

A lo fines prácticos es mas importante la menor variación en la posición C, lo que nos permitirá estimar el valor de la misma con cualquier método no destructivo (ej: pilodyn), muestreando siempre en la misma dirección.

En base a los datos obtenidos en el cuadro anterior se procedió a realizar los intervalos de confianza para las varianzas (95% confianza) con el objetivo de poder conocer la amplitud del valor obtenido.

4.3.2. Intervalos de confianza.

Lo más apropiado en un análisis de varianzas es utilizar la distribución chi cuadrado χ^2 , por tanto se realizaron intervalos de confianza para éste tipo de distribución.

Cuadro 7. Intervalos de confianza (95%) para las varianzas.

		DENSIDAD		MOE *		MOR	
		LIMITE INF	LIMITE SUP	LIMITE INF	LIMITE SUP	LIMITE INF	LIMITE SUP
A	Entre Árboles	0,000997	0,01674	0,567646	3,18482 4	65,4607	279,78
	Entre direcciones dentro del árbol	0,004590	0,00971 1	0,884700	1,75958 9	42,1260	83,5673
B	Entre Árboles	0,000473	0,00574 1	0,756744	3,49322 7	93,8406	372,12
	Entre direcciones dentro del árbol	0,002550	0,00489 5	0,861761	1,60352 7	47,5810	88,6834
C	Entre Árboles	0,0001	0,001	1,565927	8,16258 1	119,92	465,89
	Entre direcciones dentro del árbol	0,004765	0,00849 3	1,296475	2,51919 7	51,5878	97,7401

* Para poder realizar una lectura más ágil de los resultados, a los valores del MOE se los dividió entre 1000000.

En el cuadro 7 se presentan los Intervalos de Confianza para la varianza de cada variable, los cuales muestran que se intersecan, por lo tanto los estimadores de las varianzas poblacionales son estadísticamente iguales con un 95% de confianza, salvo para la variable DENSIDAD en la cual los intervalos de confianza no se intersecan. Por tanto para éste último se puede decir que los

estimadores de las varianzas poblacionales son estadísticamente diferentes con un 95% de confianza.

Se realizaron las pruebas F para poder tener una mayor seguridad en cuanto a la significancia de los resultados anteriores.

4.3.3. Pruebas F.

A continuación se presentan las pruebas de homogeneidad de varianzas. Para dicha prueba se utilizó la distribución F: F = cociente entre dos valores de estimaciones de la varianza de una población. El F tabla se busco con un nivel de significancia del 0.05, con los grados de libertad del numerador y del denominador: $F_t(0,05, 29,29) = 1,85$.

Cuadro 8. Comparación de varianzas.

	DENSIDAD	MOE	MOR
S2B/S2A	2,27 s	0,78 ns	1,4 ns
S2C/S2B	0,001 ns	0,46 ns	1,26 ns
S2C/S2A	0,002 ns	0,77 ns	1,77 ns

Se confirma con 95% de confianza que la posición A y B tiene varianzas estadísticamente diferentes para la variable DENSIDAD. En tanto que para el resto de las posiciones y variables las varianzas no difieren estadísticamente.

En las siguientes figuras se observa la variación dentro de la posición para cada variable estudiada (DENSIDAD, MOE y MOR).

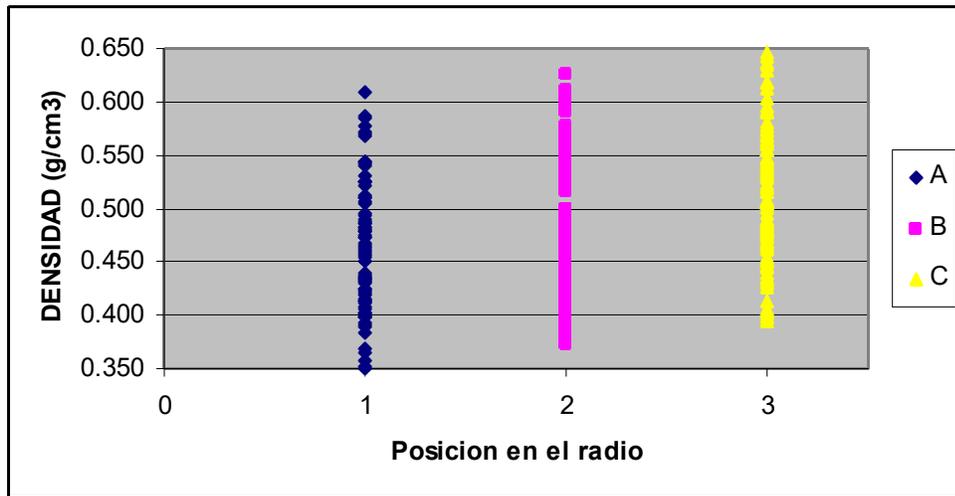


Figura 11. Variación de la Densidad dentro de cada posición en el radio.

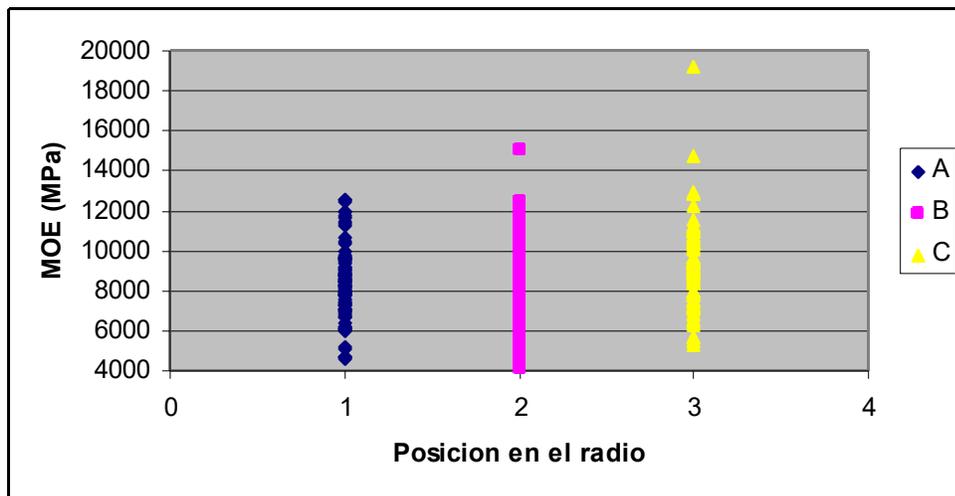


Figura 12. Variación del MOE dentro de cada posición en el radio.

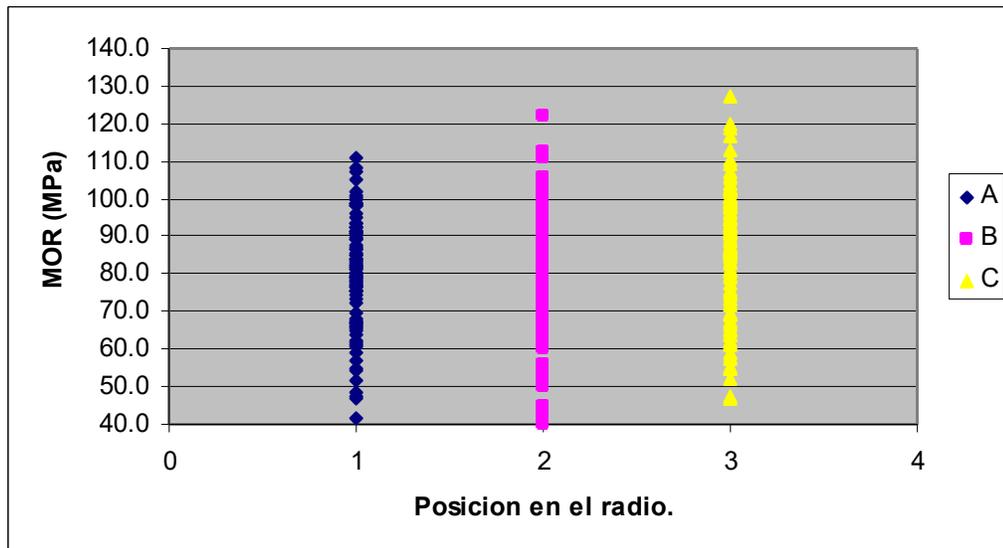


Figura 13. Variación del MOR dentro de cada posición en el radio.

Como se puede apreciar la variación dentro de cada posición es alta para las tres variables. Esto puede estar explicado por las características del material utilizado, árboles de diferentes edades, distintos sitios, etc.

4.4. INFLUENCIA DE LA EDAD EN LAS DISTINTAS PROPIEDADES.

Una vez observada la variación según su ubicación en el radio, se procedió a estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas y físicas según la edad de los árboles. En éste análisis, se intentó ajustar un modelo lineal para cada posición y cada propiedad que prediga las mismas en función de la edad de los árboles.

4.4.1. Modelos lineales.

Cuadro 9. Modelos lineales ajustados por edad según Distancia y Variable.

	MOE	MOR	DENS
DIST.1	6396,37 + 146,59 (edad) *	64,25 + 1,16 (edad) *	0,35 + 0,008 (edad) *
DIST.2	6371,37 + 179,49 (edad) *	65,5 + 1,17 (edad) *	0,38 + 0,007 (edad) *
DIST.3	7248,71 + 137,43 (edad) *	72,65 + 1,006 (edad) *	0,403 + 0,008 (edad) *

* Significativo.

Como se observa en el cuadro anterior, todos los modelos se ajustaron de forma significativa. Esto nos está demostrando la incidencia que tiene la edad de los árboles sobre estas propiedades, tal como reporta De Castro Silva et al. (2005), que encontraron correlaciones positivas entre la edad de los árboles y propiedades mecánicas (MOE y MOR).

4.5. VARIACION ENTRE GRUPO DE ÁRBOLES.

En el siguiente cuadro se observa la variación de las tres propiedades entre árboles. Para esto se separaron los mismos en tres grupos de edad:

- Grupo 1, árboles menores o iguales a 8 años de edad.
- Grupo 2, árboles mayores a 8 y menores o iguales a 14 años de edad.
- Grupo 3, árboles mayores o iguales a 14 años de edad.

Cuadro 10. Variabilidad entre árboles según grupo de edad.

Grupo de edad	n	Variable	Media	Varianza	Error estandar	Coef. de variación
1	24	DENS	0,453	0,001	0,007	7,18
		MOE	8883,81	1345041	253,08	13,05
		MOR	90,90	137,79	2,56	12,91
2	40	DENS	0,481	0,002	0,009	10,78
		MOE	8099,51	5087634	381,26	27,84
		MOR	73,25	261,13	2,73	22,05
3	44	DENS	0,561	0,001	0,006	7,50
		MOE	10069,44	4556771	341,81	21,19
		MOR	9497	312,65	2,83	18,61

Como se puede ver la mayor variación para el dato de MOE, la característica a partir de la cual se intentarían seleccionar los árboles, se presenta en el grupo de edad 2. Esto nos permitirá tener una mayor posibilidad de selección dentro de este grupo.

4.6. PREDICCIÓN DE MOE A PARTIR DE DENSIDAD.

Como se vio en los análisis anteriores (cuadro 5) la posición C (externa) es la que muestra menor variabilidad, y dado que puede determinarse de manera indirecta fácilmente, se buscó un modelo que prediga el MOE a partir del dato de DENSIDAD de las probetas C.

El análisis que se presenta a continuación intenta ajustar un modelo que prediga lo dicho para cada grupo de edad estudiado, árboles menores o iguales

a 8 años de edad (grupo 1), árboles mayores a 8 y menores o iguales a 14 años de edad (grupo 2), y árboles mayores a 14 años de edad (grupo 3).

Cuadro 11. Modelos lineales ajustados para MOE a partir de Densidad según Edad.

Grupo de edad	Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t
1	Intercepto (β_0)	8054,4668	3847,7917	2,09	0,0508
	Densidad (β_1)	1788,3017	8444,7418	0,21	0,8347 ns
2	Intercepto (β_0)	-1151,5597	2366,1569	-0,49	0,6307
	Densidad (β_1)	18114,2745	4875,1184	3,72	0,0010 **
3	Intercepto (β_0)	3488,3900	3227,9726	1,08	0,2870
	Densidad (β_1)	11310,1088	5741,1300	1,97	0,0566 *

Como se ve en los datos presentados, no se encontró un modelo que se ajuste significativamente para el grupo 1. Para los grupos 2 y 3 si se encontraron modelos que se ajustaran significativamente, con un 99% de confianza para el grupo 2 y con un 95% de confianza para el grupo 3.

Modelos

Grupo 2

MOE = - 1151,6 + 18114 (Dens).

El modelo presentado confirma la relación que existe entre la Densidad y el MOE, altos valores de Densidad determina altos valores de MOE, tal como reportan Adorno y García (2003), que encontraron una relación positiva y significativa entre densidad básica y propiedades mecánicas; Botero, Hillis, Méndez, Sales, Nascimento, citados por Adorno y García (2003), muestran que

cuanto mayor es el valor de densidad básica, mayores valores de propiedades mecánicas se pueden esperar en la madera.

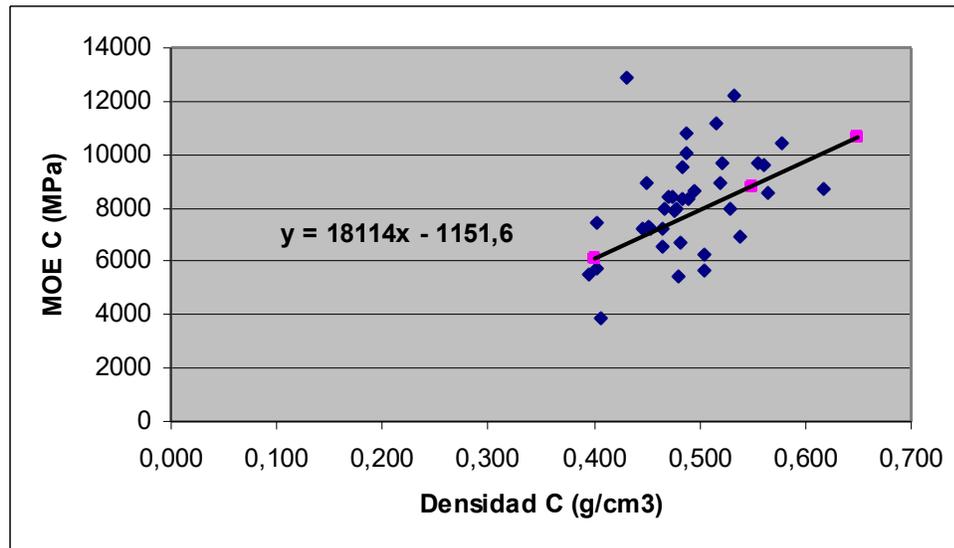


Figura 14. Modelo ajustado para el MOE en función de la Densidad (Grupo 2).

En el gráfico anterior podemos observar como valores altos de densidad determinan, con cierta dispersión, valores altos de MOE.

Existe una importante dispersión en la predicción de los valores de MOE a partir de la Densidad, esto puede estar influenciado por la variabilidad del material en cuanto a edad de los árboles, sitios de plantación y otros factores.

También podría estar influyendo en esta dispersión el comportamiento variable de la madera juvenil. En relación a esto Burdon et al. (2004), citados en la bibliografía, propone una nueva clasificación de la madera juvenil de pino que si se pudiera aplicar a maderas de latifoliadas contribuiría también a explicar esta dispersión.

Grupo 3

$$\text{MOE} = 3488 + 11310 (\text{Dens}).$$

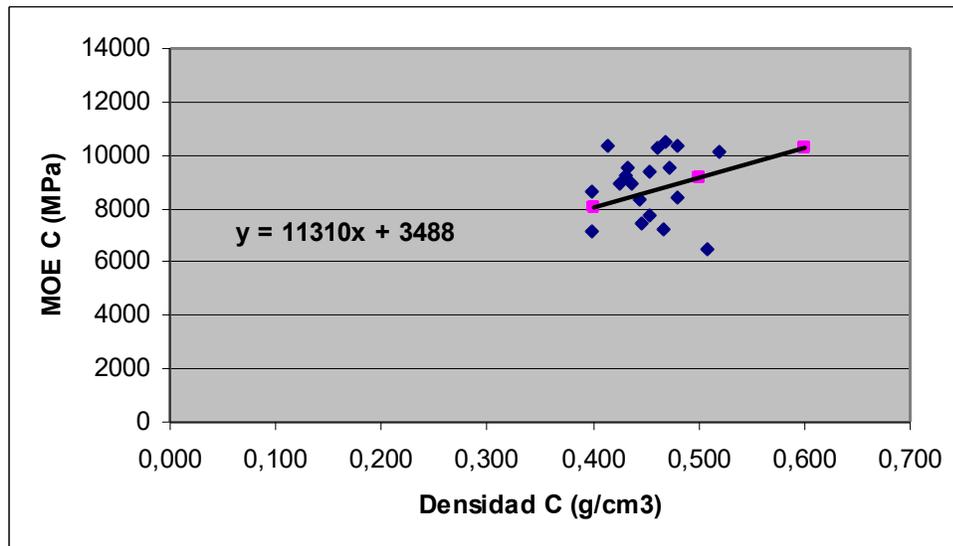


Figura 15. Modelo ajustado para el MOE en función de la Densidad (Grupo 3).

Los modelos encontrados tanto para el grupo 2 (99% confianza) como para el grupo 3 (95% confianza) presentan rangos muy altos. Esto se puede deber a que aunque la densidad tiene una importante influencia en las propiedades mecánicas, existen otras características que también influyen sobre las mismas, como el ángulo microfibrilar, largo de fibra y otros.

En cuanto al comportamiento radial como longitudinal de estas características, muy relacionadas con el tipo de madera (juvenil o adulta), Burdon et al. (2004), trabajando en coníferas, proponen una nueva clasificación de la misma desde médula (juvenile corewood) a corteza (juvenile outerwood) y desde la base de los árboles (juvenile corewood) hasta los 5 m de altura (mature corewood).

Dado que en esta investigación se trabajo con material basal, no mas de 1,5 m de altura, si se pudiera aplicar la nueva clasificación de Burdon et al. (2004) a la madera de latifoliadas, entonces podríamos explicar mejor la dispersión en los resultados obtenidos.

4.7. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE FAKOPP.

A continuación se presentan los niveles de correlación de Spearman entre los valores de MOE (ponderados y de las probetas C) obtenidos en Máquina Universal (Método Destructivo) y el MOE estimado con Fakopp (Método no Destructivo). Adicionalmente se intentaron ajustar modelos que predigan las características antes dichas a partir de Fakopp.

Para realizar estos análisis se separaron los árboles en dos grupos de edad, menores o iguales a 18 años y mayores o iguales a 19 años.

Cuadro 12. Coeficiente de correlación de Pearson.

Grupo de edad	Variable	Correlación de Spearman (con Fakopp)	Pr > r
1	MOE	0,5649	0,0702 ns
	MOEPC	0,2414	0,4744 ns
2	MOE	0,3386	0,1562 ns
	MOEPC	0,3912	0,0977 ns

Los coeficientes de Spearman calculados entre las distintas variables analizadas son relativamente bajos para los dos grupos de edad estudiados.

Grupo de edad 1

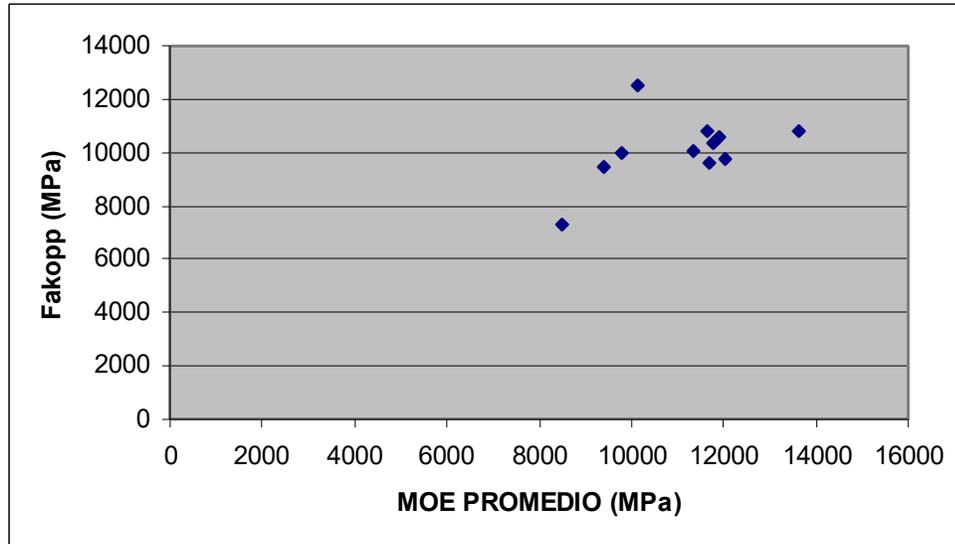


Figura 16. Relación entre Fakopp y MOE promedio para grupo 1.

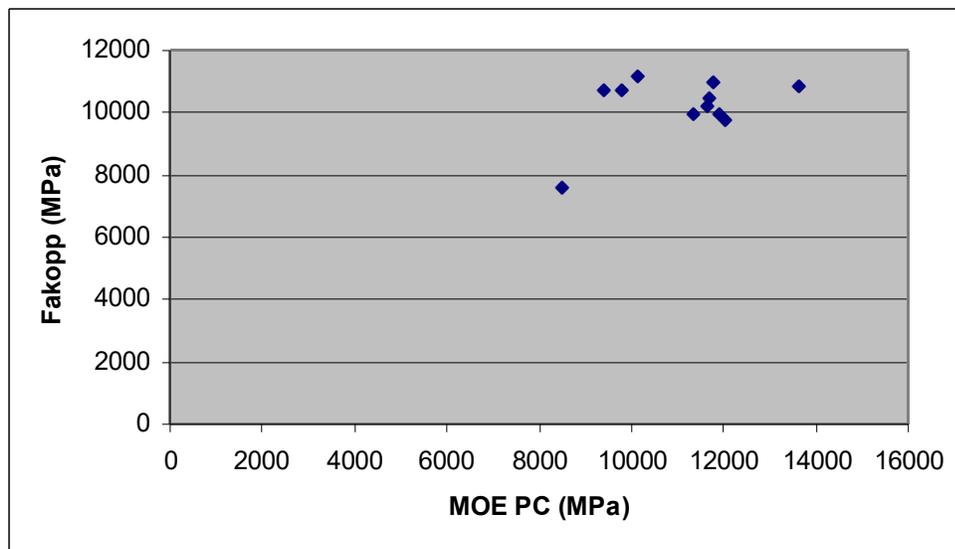


Figura 17. Relación entre Fakopp y MOE PC promedio para grupo 1.

Grupo de edad 2

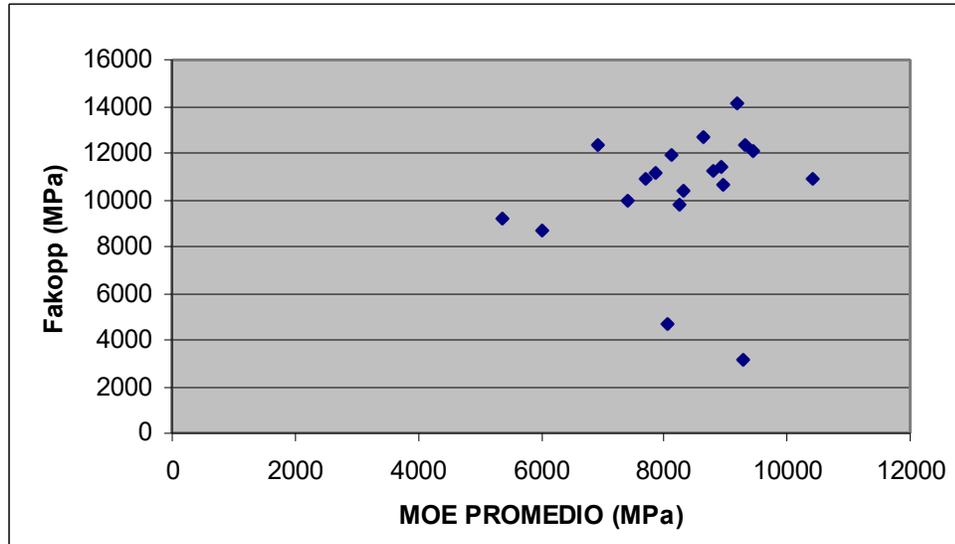


Figura 18. Relación entre Fakipp y MOE promedio para grupo 2.

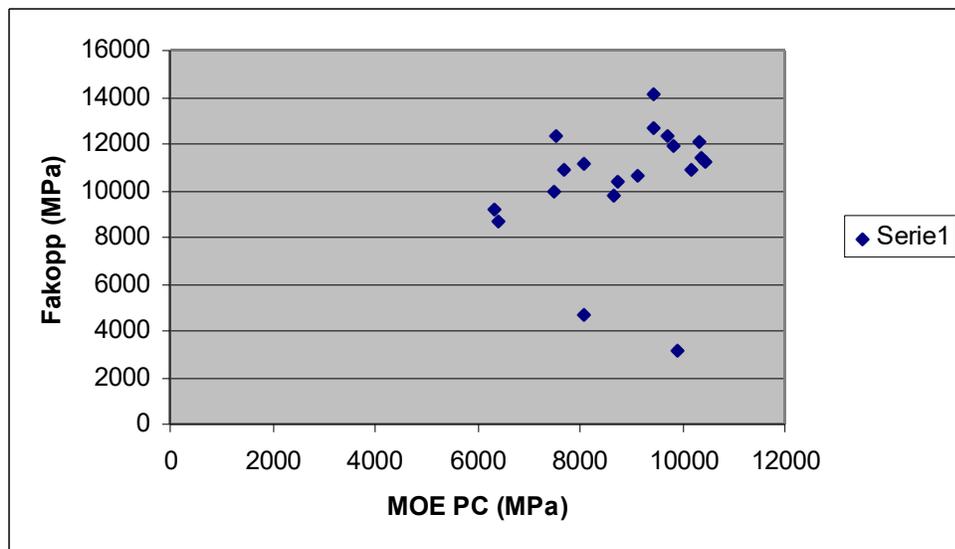


Figura 19. Relación entre Fakopp y MOE PC para grupo 2.

En las figuras anteriores se puede observar la inexistencia de correlaciones entre las variables analizadas. Esto contradice resultados encontrados por Pérez del Castillo (2001), que reporta coeficientes de correlación de 0,921 para tablas B y 0,974 para tablas C ensayadas en Máquina Universal (luz 2520 mm) y el Fakopp de las respectivas tablas.

Cuadro 13. Modelos lineales ajustados según grupo de edad.

Grupo de edad	Variable	Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t
1	MOE	Intercepto(β_0)	5326,6342	2778,1504	1,92	0,0874
		Fakopp (β_1)	0,4378	0,2525	1,73	0,1169ns
	MOEPC	Intercepto(β_0)	6629,8526	2189,8584	3,03	0,0143
		Fakopp (β_1)	0,3291	0,1990	1,75	0,1326ns
2	MOE	Intercepto(β_0)	7527,4221	1186,4577	6,34	<0,0001
		Fakopp (β_1)	0,0702	0,1107	0,63	0,5347ns
	MOEPC	Intercepto(β_0)	7694,3264	1252,5867	6,14	<0,0001
		Fakopp (β_1)	0,1092	0,1169	0,93	0,3633ns

Como se puede ver en el análisis, no se encontró ningún modelo que prediga de manera significativa el MOE ponderado o el MOE PC (MOE de las probetas C) a partir del Fakopp para ninguno de los grupos de edades analizados.

5. CONCLUSIONES.

Es importante al momento de intentar seleccionar árboles eliminar toda variación ambiental, efecto año, sitio, etc., para asegurarnos de esta forma que estamos seleccionando la superioridad genética exclusivamente.

Existe una variación clara en el sentido médula a corteza para las tres propiedades estudiadas. Los valores de las mismas aumentan a medida que nos acercamos a la corteza. Estas propiedades están fuertemente influenciadas por el tipo de madera (juvenil/adulta), a medida que disminuye la madera juvenil y aumenta la adulta obtenemos mayores valores en todas las propiedades.

En cuanto a la variabilidad entre posiciones dentro del árbol, se recomienda muestrear en la posición C. Esta zona además de mostrar la menor variación entre posiciones, debido a que está compuesta mayormente de madera adulta (más estable), es un lugar de fácil acceso para la determinación directa o indirecta de estas propiedades.

Se pueden preseleccionar árboles por MOE, de entre 8 y 14 años de edad, aplicando el modelo ajustado a partir del dato de Densidad, el cual se puede estimar por métodos directos (Calador de Presler) o indirectos (Pilodyn). A los mejores árboles preseleccionados a partir de este modelo se recomienda ensayarlos mecánicamente a fin de determinar con mayor precisión su Módulo de Elasticidad.

A partir de los datos obtenidos no se recomienda el uso del instrumento Fakopp como método indirecto de estimación del Módulo de Elasticidad en pie.

6. RESUMEN.

Se estudiaron las propiedades físico – mecánicas (DENSIDAD, MOE y MOR) de *E. grandis*, siendo éstos, árboles plus de diferentes edades del norte del país. En este estudio se trabajó con trozas de 60 cm (30 cm por encima del DAP y 30 cm por debajo) de cada árbol. De éstas se extrajeron pequeñas probetas libres de defectos en sentido radial, las cuales fueron identificadas según la posición a la cual pertenecían en sentido médula - corteza (“A”, “B” y “C”). Se determinó que el mejor lugar de muestreo en sentido radial era la posición C, la cual presentaba menor variación en DENSIDAD. Se ajustó un modelo para predecir el MOE a partir de la DENSIDAD de la posición C y dentro del rango de edad entre 8 y 14 años de edad. Se estudió la correlación del equipo FAKOPP y el dato obtenido en la Máquina Universal, y se observó la inexistencia de la misma.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*; Propiedades físico – mecánicas;
Densidad; Módulo de elasticidad; Módulo de rotura; Fakopp.

7. SUMMARY.

Physical and mechanical properties (DENSITY, MOE and MOR) of *E. grandis* were studied. Samples were taken from different ages “plus Trees” obtained from stands located in northern Uruguay. In the present work a sampling of logs has been taken from each tree. Small test tubes free from defects were extracted from these logs in the radial sense. Each one of these was identified as “A”, “B” or “C”, according to its position in the narrow-bark sense. Position “C” was determinate as the best sampling point in radial sense because of its smaller Density variation. The data obtained from the experiments were adjusted to predict MOE from density (position “C”) between 8 and 14 years of range. According to the results that were obtained, it can be said that, there is no correlation between the FAKOPP data and those of the Universal Machine.

Key words: *Eucalyptus grandis*; Physical and mechanical wood properties; Density; Modulus of elasticity; Modulus of rupture; Fakopp.

8. BIBLIOGRAFÍA.

1. ACHUGAR, L. A.; SCAGLIONE, G. 2003. Evaluación de propiedades de la madera de clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 97 p.
2. ADORNO, M. DE F. C.; GARCIA, J. N. 2003. Correlações lineares entre as principais características tecnológicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Scientia Forestalis. no. 63: 44-53.
3. ASOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. 1942. Bois-essai de flexion statique. Paris. s.p.
4. BACKMAN, M. E.; GARCÍA DE LEON, J. P. 2003 Correlations of pulp and paper properties at an early age full rotation age of five Eucalyptus species. In: Conferencia EUCEPA (2003, Aveiro, Portugal). Trabajos presentados. s.n.t. s.p.
5. BHAT, K. V.; DHAMODARAN, T. K. 1990. Wood density and fibre length of *Eucalyptus grandis* groen in Kerala, India. Wood and Fibre Science. 22(1): 54-61.
6. BODIG, J.; JAYNE, B. A. 1982. Mechanicals of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold. 712 p.
7. BOTHIG, S. 2001. Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 23 p. (Informe de Investigación no. 5).
8. BURDON, R.; WALKER, J.; MEGRAW, B.; EVANS, R.; COWN, D. 2004. Juvenil wood (*sensu novo*) in pine; conflicts and possible opportunities for growing, processing and utilisation. New Zealand. Journal of Forestry. 49 (3): 24-31.
9. BUZZO, R. M.; MARTINEZ HAEDO, J. F.; SCARONE, P. 1997. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Populus deltoides* cv "Harvard" (ex I-63/51). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.

10. CALVO, C. F.; CORTINA, A. D.; CUFFRE, A. G.; PITER, J.C.; STEFANI, P.M.; TORRAN, E. A. 2004. Deformaciones diferidas en probetas pequeñas y libres de defectos de *E. grandis* de Argentina. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. Universidad Tecnológica Nacional. Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional de Concepción del Uruguay. 18 p.
11. CENTURION, C.; LLANO, L. 1995. Determinación de peso específico aparente por los métodos Unit 237-70y máximo tenor de humedad con probetas de incremento radial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Tesis Ing Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
12. CORDOVIL, F. A. B.; ALMEIDA, P. A. O. 1995. Influência da densidade na resistencia da madeira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (5º.,1995, Belo Horizonte). Anais. Belo Horizonte, UFMG/CEFET.MG. v.2, pp. 143-152.
13. CORONEL, E. O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas; aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. 187 p.
14. CHAPOLA, G. B. J.; NGULUBE, M. R. 1990. Basic density of some hardwood species grown in Malawi. South African Forestry Journal. no. 153: 12-17.
15. DE CASTRO SILVA, J.; DA SILVA OLIVEIRA, J. T.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JUNIOR, S.; MONTEIRO DE MATOS, J. L. 2004. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista Floresta. 34 (1): 13-22.
16. _____; MONTEIRO DE MATOS, J. L.; DA SILVA OLIVEIRA, J. T.; VIANA EVANGELISTA, W. 2005. Influência da idade e da posição radial na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista Árvore. 29(5): 795-799.
17. DE SOUZA, V. R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELO, L. E. G. 1986. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* E *E. Saligna*. Instituto de Pesquisas e Estudos Forestales. (IPEF). no. 33: 65-72.

18. DOLDAN, J. 2003. Indicadores de calidad de madera de *Eucalyptus grandis* de Rio Negro, Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 40 p. (Informe de Investigación no. 9)
19. DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, L. R.; MUNERI, E. A. 1997. Sampling plantations; eucalyptus for wood and fibre properties. Melbourne, CSIRO. 132 p.
20. FAKOPP. 2006. FAKOPP Enterprise Bt. (en línea). Hungría. Consultado nov. 2006. Disponible en <http://www.fakopp.com/>.
21. FERNÁNDEZ, E. M. 2004. Selección de clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) por crecimiento y propiedades de la madera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 71 p.
22. GAIOTTO, M. R. 1988. Influência da idade e do espaçamento sobre a qualidade da madeira para produção de celulose. Piracicaba, Universidade de São Paulo. Escuela Superior de Agricultura Luis de Queiroz. 17 p.
23. GRUPO TÉCNICO DE MADERA ASERRADA DE PINO. 2002. Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay. Montevideo, LATU. 44 p. (Informe de Investigación no. 1)
24. HANS, A. S.; BURLEY, J. 1972. Wood quality of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden in a fertilizer trial at Siamambo, Zambia. East African Agriculture and Forestry Journal. 38 (2): 157-161.
25. _____. 1974. Artificial *Eucalyptus grandis* x *tereticornis* hybrids; survival, growth and Wood density studies. East Agriculture and Forestry Journal. 39 (3): 321-324.
26. HELLMEISTER, J. C. 1982. Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos. Tesis (Doutorado). São Paulo, Brasil. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 119 p.
27. _____. 1983. Madeiras e suas características. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estructuras de Madeira (1º., 1983, São Carlos). Anais. São Carlos, USP/EESC/SET/LaMEM. v. 1, s.p.

28. HERMOSO PRIETO, E. 2001. Características mecánicas de la madera estructural de *Pynus sylvestris* L. Tesis Doctoral. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. s.p.
29. HILLIS, W. E. 1978. Wood quality and utilization. In: Eucalyptus for wood production. Melbourne, CSIRO. pp. 258-289.
30. _____. 1984 Eucalypts for wood production. Melbourne, SIRO/Academic Press. 434 p.
31. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). 1995. Manual para productores de Eucalyptus de la Mesopotamia Argentina. Concordia, Argentina, INTA. s.p.
32. INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. 1970. Determinación del peso específico aparente en maderas, UNIT 237. Montevideo, Uruguay. 6 p.
33. KOLLMAN, F. F. P.; COTE, W. A. 1968. Principles of wood science and technology. Berlin, Springer-Verlag. v. 1, 592 p.
34. MALAN, F. S. 1988. Wood density variation in four trees of south african grown *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden). South African Forestry Journal. no. 144: 36-42.
35. _____.; HOON, M. 1992. Effect of initial apacing and thinning on some wood propierties of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal. no. 163: 13-20.
36. MANTERO, C. 2001. Posibilidades de uso de la madera de eucaliptos colorados en carpintería de obra *Eucalyptus tereticornis* Smith – *Eucalyptus camaldulensis* Dehnhardt. Uruguay Forestal. 11(28): 4-8.
37. MARCÓ, M.A; LÓPEZ, J.A. 1995. Performance of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in the Mesopotamia region, Argentina. In: Conference for Temperate Hardwood Forestry (1995, Tasmania, Australia). Eucalypt plantations; improving fibre yield and quality. Hobart, IUFRO. pp. 40-45.

38. MELO, J. E.; SIQUEIRA, M. J. 1992. Correlação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras da Amazônia. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (4º., 1992, São Carlos). Anais. São Carlos, USP/EESC/SET/LaMEM. v. 1, pp. 67-76.
39. MOURA, M. C. O. 2000 Variações em características de crescimento e da madeira em clones de *Eucalyptus*. Tesis (Mestrado). Lavras, Brasil. Universidade Federal de Lavras. 63 p.
40. PÉREZ DEL CASTILLO, A.; DE CASTRO, R; OHTA, S. 2000. Ensayos de propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Montevideo, LATU/JICA. 24 p. (Informe de Investigación no. 1)
41. _____. 2001a. Modulo de elasticidad y modulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliotii* del Sur de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 35 p. (Informe de investigación no. 7)
42. _____. 2001b. Propiedades mecánicas y calidad de la madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 44 p. (Informe de investigación no. 4)
43. _____.; VENTURINO, A. 2003. Resumen de propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliotii* y *Pinus Taeda* de distintas zonas del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 31 p. (Informe de Investigación no. 14)
44. PITER, J. C. 2003. Clasificación por resistencia de la madera aserrada de como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* en Argentina. Tesis Doctor en Ingeniería. La Plata, Argentina. Facultad de Ingeniería. 206 p.
45. ROGERIO DA CRUZ, C.; TARSISO LIMA, J. 2003. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. Scientia Forestalis. no. 64: 33- 47.
46. SANCHEZ ACOSTA, M. 2003. Variación tecnológica y aptitud de la madera de distintos orígenes y procedencias de *Eucalyptus grandis* utilizados comercialmente en Argentina; informe final. Proyecto Forestal de desarrollo SAGPYA – BIRF. EEA INTA Concordia. Concordia, Entre Ríos, INTA. 27 p.

47. TANAAMI, R. G. 1986. Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e elasticidade à flexão da madeira. Tesis (mestrado). São Carlos, Brasil. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 200 p.
48. TAYLOR, F. W. 1984. Differences in the wood of *Eucalyptus grandis* grown in different parts of South Africa. South African Forestry Journal. no. 91: 14-18.
49. TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; LIMA, J. T. 1996. Influencia da idade nas características físicas, químicas e anatómicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: Simposio Internacional sobre Ecosistemas Florestais (4º., 1996, Belo Horizonte, BR). Trabalhos apresentados. s.n.t. pp. 71-72.
50. TUSET, R.; DURAN, F. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
51. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERIA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL FORESTAL. 2005. Boletín estadístico; diciembre de 2005. 44 p. Consultado nov. 2006. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/Forestal/DGF.htm>
52. WALKER, J.C.F.; WOOLONS, R.C. 1997. Cell wall organization and the properties of xylem – a speculative review. In: Microfibril angle in wood. B.G. Butterfield ed. Westport, New Zealand, University of Canterbury. pp. 13-26.
53. WILKINS, A. P. 1990. Influence of silvicultural treatment on growth and wood density of *Eucalyptus grandis* grown on a previous pasture site. Australian Forestry. 53 (3): 168-172.
54. XAVIER, A.; GONCALVES BORGES, R. C.; CRUZ, C. D.; CECON, P. R. 1997. Parâmetros genéticos de características de qualidade da madeira em *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore. 21(1): 71-78.
55. ZOBEL, B. J.; TALBERT, J. T. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. 2ª. reimp. México, Limusa. 545 p.
56. _____; JETT, J. B. 1995. Genetics of wood production. Berlin, Springer-Verlag. 337 p.

9. ANEXOS.

ANEXO 1. Datos individuales de cada probeta.

Árbol	Edad	Posición	Dirección	MOE	MOR	DENS
ARB1	83	A	1	8427	78	0.525
	83	B	1	8838	81	0.522
	83	C	1	10972	73	0.574
	83	A	2	11992	98	0.541
	83	B	2	11088	92	0.530
	83	C	2	9385	85	0.556
	83	A	3	8768	84	0.425
	83	B	3	10028	95	0.548
	83	C	3	9344	83	0.535
	83	A	4	9629	91	0.490
	83	B	4	9602	86	0.527
	83	C	4	9098	93	0.547
ARB2	83	A	1	12553	96	0.571
	83	B	1	10813	92	0.597
	83	C	1	11097	117	0.638
	83	A	2	11696	102	0.585
	83	B	2	11581	101	0.626
	83	C	2	12825	119	0.646
	83	A	3	10616	99	0.587
	83	B	3	10799	96	0.602
	83	C	3	9126	99	0.603
	83	A	4	.	.	.
	83	B	4	10984	91	0.590
	83	C	4	9573	92	0.613
ARB3	85	A	1	12553	89	0.479
	85	B	1	10813	97	0.528
	85	C	1	11097	99	0.548
	85	A	2	11494	105	0.544
	85	B	2	11696	111	0.519
	85	C	2	11581	141	0.591
	85	A	3	11391	101	0.485
	85	B	3	10616	90	0.598
	85	C	3	10799	113	0.568
	85	A	4	7293	93	0.510
	85	B	4	10984	93	0.570
	85	C	4	9573	127	0.593

Continuación de ANEXO 1.

ARB4	85	A	1	8783	81	0.544
	85	B	1	6286	64	0.538
	85	C	1	7114	64	0.565
	85	A	2	6639	57	0.505
	85	B	2	7924	61	0.537
	85	C	2	7160	57	0.536
	85	A	3	6178	61	0.460
	85	B	3	5356	51	0.497
	85	C	3	7221	62	0.507
	85	A	4	7992	75	0.513
	85	B	4	8191	78	0.525
	85	C	4	7533	72	0.534
ARB5	85	A	1	.	93	0.473
	85	B	1	12419	96	0.000
	85	C	1	11193	98	0.489
	85	A	2	8516	90	0.458
	85	B	2	8975	88	0.481
	85	C	2	9022	81	0.507
	85	A	3	.	.	.
	85	B	3	10041	94	0.483
	85	C	3	10983	96	0.544
	85	A	4	8156	81	0.495
	85	B	4	11940	81	0.473
	85	C	4	9065	91	0.501
ARB6	85	A	1	10359	107	0.608
	85	B	1	11330	94	0.521
	85	C	1	9368	95	0.596
	85	A	2	8970	82	0.569
	85	B	2	8704	79	.
	85	C	2	7481	85	0.509
	85	A	3	.	.	.
	85	B	3	8987	99	0.569
	85	C	3	9350	109	0.590
	85	A	4	.	.	.
	85	B	4	.	.	.
	85	C	4	.	.	.
ARB7	85	A	1	10467	108	0.567
	85	B	1	11434	112	0.517
	85	C	1	9119	92	0.635
	85	A	2	11744	111	.
	85	B	2	12412	122	0.612
	85	C	2	9481	104	0.619
	85	A	3	11250	98	0.506
	85	B	3	10279	104	0.522
	85	C	3	10512	106	0.578
	85	A	4	.	.	.
	85	B	4	.	.	.
	85	C	4	.	.	.

Continuación de ANEXO 1.

ARB8	85	A	1	9630	67	0.524
	85	B	1	9689	66	0.516
	85	C	1	10470	79	0.516
	85	A	2	9541	78	0.521
	85	B	2	9365	76	0.490
	85	C	2	11250	87	0.540
	85	A	3	9578	79	0.486
	85	B	3	11208	87	0.542
	85	C	3	12899	86	0.531
	85	A	4	.	.	.
	85	B	4	10036	87	0.530
	85	C	4	7951	81	0.563
ARB9	86	A	1	9073	93	0.475
	86	B	1	9411	86	0.483
	86	C	1	9474	102	0.574
	86	A	2	9709	92	0.465
	86	B	2	10716	104	0.494
	86	C	2	10651	98	0.542
	86	A	3	8595	88	0.488
	86	B	3	9118	95	0.486
	86	C	3	11280	102	0.546
	86	A	4	8855	95	0.483
	86	B	4	10549	98	0.538
	86	C	4	9029	84	0.561
ARB10	86	A	1	6731	84	0.422
	86	B	1	9096	97	0.490
	86	C	1	13151	120	0.630
	86	A	2	8178	92	0.472
	86	B	2	10548	106	0.521
	86	C	2	9990	110	0.571
	86	A	3	7158	82	0.415
	86	B	3	7249	82	0.447
	86	C	3	9085	95	0.486
	86	A	4	7307	75	0.424
	86	B	4	10844	105	0.486
	86	C	4	9230	101	0.524
ARB11	86	A	1	.	.	.
	86	B	1	.	.	.
	86	C	1	.	.	.
	86	A	2	.	.	.
	86	B	2	.	.	.
	86	C	2	19176	106	0.581
	86	A	3	9531	100	0.540
	86	B	3	10200	105	0.543
	86	C	3	.	.	.
	86	A	4	.	.	.
	86	B	4	.	.	.
	86	C	4	.	.	.

Continuación de ANEXO 1.

ARB12	87	A	1	7739	100	0.526
	87	B	1	11144	112	0.659
	87	C	1	9502	93	0.618
	87	A	2	6967	91	0.000
	87	B	2	8826	87	0.578
	87	C	2	9632	107	0.643
	87	A	3	8275	98	0.000
	87	B	3	11220	104	0.562
	87	C	3	8894	95	0.555
	87	A	4	.	.	.
	87	B	4	.	.	.
	87	C	4	.	.	.
ARB13	91	A	1	8795	87	0.465
	91	B	1	11873	93	0.430
	91	C	1	11167	100	0.515
	91	A	2	7930	65	0.456
	91	B	2	8491	78	0.420
	91	C	2	10783	89	0.487
	91	A	3	7842	83	0.455
	91	B	3	7844	79	0.407
	91	C	3	7969	85	0.529
	91	A	4	9759	86	0.531
	91	B	4	9191	94	0.520
	91	C	4	9644	90	0.555
ARB14	93	A	1	8306	85	0.430
	93	B	1	15048	77	0.499
	93	C	1	.	.	.
	93	A	2	.	.	.
	93	B	2	10159	90	0.442
	93	C	2	14719	75	0.440
	93	A	3	7774	66	0.494
	93	B	3	8642	60	0.524
	93	C	3	12891	61	0.432
	93	A	4	8465	69	0.467
	93	B	4	10379	76	0.487
	93	C	4	8341	58	0.484
ARB15	93	A	1	9157	80	0.511
	93	B	1	7770	64	0.544
	93	C	1	.	.	.
	93	A	2	9074	66	0.483
	93	B	2	9067	79	0.516
	93	C	2	9498	74	0.483
	93	A	3	.	.	.
	93	B	3	8638	78	0.529
	93	C	3	6282	65	0.505
	93	A	4	6351	77	0.479
	93	B	4	7663	81	0.553
	93	C	4	8906	73	0.520

Continuación de ANEXO 1.

ARB16	96	A	1	4736	47	0.389
	96	B	1	7423	53	0.463
	96	C	1	8384	47	0.474
	96	A	2	7052	62	0.435
	96	B	2	6481	61	0.412
	96	C	2	5646	81	0.505
	96	A	3	4583	41	0.420
	96	B	3	6598	56	0.493
	96	C	3	6902	62	0.539
	96	A	4	7257	54	0.392
	96	B	4	7363	71	0.476
	96	C	4	9691	72	0.522
ARB17	96	A	1	.	.	.
	96	B	1	4996	50	0.443
	96	C	1	6733	64	0.481
	96	A	2	.	.	.
	96	B	2	5527	51	0.377
	96	C	2	5714	52	0.402
	96	A	3	4651	48	0.402
	96	B	3	4482	40	0.373
	96	C	3	5519	55	0.394
	96	A	4	5094	55	0.413
	96	B	4	4053	45	0.392
	96	C	4	3900	56	0.406
ARB18	96	A	1	8519	68	0.414
	96	B	1	7884	66	0.415
	96	C	1	7222	70	0.453
	96	A	2	6012	67	0.433
	96	B	2	6096	65	0.432
	96	C	2	6552	78	0.465
	96	A	3	7086	77	0.438
	96	B	3	7770	79	0.472
	96	C	3	8005	76	0.467
	96	A	4	7778	80	0.481
	96	B	4	8048	80	0.457
	96	C	4	7296	75	0.452
ARB19	96	A	1	8315	66	0.399
	96	B	1	7354	34	0.404
	96	C	1	10065	64	0.487
	96	A	2	.	.	.
	96	B	2	7729	43	.
	96	C	2	6433	47	.
	96	A	3	.	.	.
	96	B	3	5643	54	0.499
	96	C	3	7258	59	0.446
	96	A	4	8051	52	.
	96	B	4	7280	50	0.410
	96	C	4	7450	69	0.403

Continuación de ANEXO 1.

ARB20	96	A	1	.	.	.
	96	B	1	6894	65	0.485
	96	C	1	9599	103	0.560
	96	A	2	6635	75	0.577
	96	B	2	7322	73	0.531
	96	C	2	8612	86	0.000
	96	A	3	.	.	.
	96	B	3	.	.	.
	96	C	3	10406	100	0.577
	96	A	4	.	.	.
	96	B	4	.	.	.
	96	C	4	.	.	.
ARB21	96	A	1	4730	64	.
	96	B	1	6399	68	.
	96	C	1	5339	65	.
	96	A	2	6230	47	0.450
	96	B	2	6135	69	0.499
	96	C	2	5442	55	0.480
	96	A	3	6088	65	.
	96	B	3	5531	63	.
	96	C	3	7214	67	0.464
	96	A	4	.	.	.
	96	B	4	.	.	.
	96	C	4	.	.	.
ARB22	96	A	1	7355	74	0.433
	96	B	1	8897	87	0.457
	96	C	1	.	.	.
	96	A	2	.	.	.
	96	B	2	9636	91	0.459
	96	C	2	8370	98	0.490
	96	A	3	8023	89	0.000
	96	B	3	9101	97	0.536
	96	C	3	12244	96	0.533
	96	A	4	7084	85	0.000
	96	B	4	8143	86	0.426
	96	C	4	10474	103	.
ARB23	96	A	1	8184	78	.
	96	B	1	7085	72	0.406
	96	C	1	7945	94	0.478
	96	A	2	7522	73	0.383
	96	B	2	8374	88	0.458
	96	C	2	7890	85	0.476
	96	A	3	9174	87	.
	96	B	3	8917	90	0.439
	96	C	3	8725	93	0.618
	96	A	4	7287	75	0.390
	96	B	4	7602	82	.
	96	C	4	7816	86	.

Continuación de ANEXO 1.

ARB24	97	A	1	6939	80	0.398
	97	B	1	8220	80	0.450
	97	C	1	8966	87	0.450
	97	A	2	6777	61	0.420
	97	B	2	9311	88	.
	97	C	2	8600	86	0.564
	97	A	3	7620	76	0.408
	97	B	3	8052	83	0.427
	97	C	3	8384	87	0.470
	97	A	4	7909	84	.
	97	B	4	9796	85	0.432
	97	C	4	.	.	0.000
ARB25	98	A	1	7801	80	0.352
	98	B	1	9356	93	0.377
	98	C	1	8646	98	0.496
	98	A	2	5236	67	0.405
	98	B	2	8540	91	0.443
	98	C	2	9498	99	0.473
	98	A	3	9410	73	0.398
	98	B	3	8771	90	0.433
	98	C	3	10314	99	0.414
	98	A	4	7870	82	0.400
	98	B	4	8858	90	0.435
	98	C	4	9269	102	0.430
ARB26	98	A	1	7402	79	0.332
	98	B	1	8016	80	0.430
	98	C	1	7481	85	0.447
	98	A	2	8899	79	0.432
	98	B	2	7002	80	0.417
	98	C	2	8426	91	0.479
	98	A	3	.	.	.
	98	B	3	7421	83	0.437
	98	C	3	.	.	.
	98	A	4	8229	84	0.338
	98	B	4	7571	75	0.457
	98	C	4	8335	88	0.445
ARB27	98	A	1	8653	79	0.412
	98	B	1	9622	89	0.400
	98	C	1	10513	100	0.469
	98	A	2	8725	83	0.369
	98	B	2	9681	86	0.405
	98	C	2	8914	87	0.436
	98	A	3	7820	77	0.366
	98	B	3	10562	87	0.456
	98	C	3	8970	91	0.426
	98	A	4	.	.	.
	98	B	4	8612	84	.
	98	C	4	10378	104	0.481

Continuación de ANEXO 1.

ARB28	98	A	1	8592	91	0.462
	98	B	1	7102	81	0.522
	98	C	1	9539	103	0.434
	98	A	2	9502	99	.
	98	B	2	8278	99	.
	98	C	2	7741	100	0.454
	98	A	3	12466	98	.
	98	B	3	7939	103	0.433
	98	C	3	.	.	0.433
	98	A	4	8790	91	0.413
	98	B	4	8508	90	0.420
	98	C	4	10144	103	0.519
ARB29	98	A	1	6921	67	0.350
	98	B	1	7074	63	0.453
	98	C	1	7250	67	0.467
	98	A	2	6135	62	0.432
	98	B	2	6169	65	0.440
	98	C	2	6487	69	0.507
	98	A	3	.	.	.
	98	B	3	.	.	.
	98	C	3	9215	80	.
	98	A	4	6052	59	0.357
	98	B	4	6679	62	0.386
	98	C	4	7177	67	0.399
ARB30	98	A	1	8578	91	0.439
	98	B	1	10210	101	0.428
	98	C	1	10245	95	0.461
	98	A	2	9943	91	0.402
	98	B	2	9679	93	.
	98	C	2	8652	89	0.399
	98	A	3	8894	86	0.436
	98	B	3	8383	78	0.395
	98	C	3	9366	92	0.454
	98	A	4	8325	79	.
	98	B	4	8695	82	0.433
	98	C	4	.	.	.

ANEXO 2. Datos promedios de MOE y Fakopp para cada árbol.

Árbol	Edad	MOE Fakopp	MOE (Mag. Univ.)	MOE PC	Fakopp S	Fakopp N
ARB1	83	9804	9952	10702	3.24	3.15
ARB2	83	11663	10831	10202	2.87	2.99
ARB3	85	11777	10368	10976	2.95	2.88
ARB4	85	11906	10554	9983	2.84	2.96
ARB5	85	11342	10020	9982	2.95	2.99
ARB6	85	11666	9636	10481	2.86	3.00
ARB7	85	13631	10831	10860	2.66	2.76
ARB8	85	8507	7296	7590	3.38	3.48
ARB9	86	10244	9726	9788	3.13	3.12
ARB10	86	9408	9433	10702	3.15	3.38
ARB11	86	10129	12523	11184	3.23	3.06
ARB12	87	12066	9437	10348	2.92	2.84
ARB13	91	3107	9274	9891	5.63	5.72
ARB14	93	10392	8325	8749	3.02	3.19
ARB15	93	10900	10399	10156	2.99	3.07
ARB16	96	10934	7684	7705	3.00	3.05
ARB17	96	9181	5356	6322	3.42	3.19
ARB18	96	9988	7393	7506	3.14	3.19
ARB19	96	8679	6027	6406	3.53	3.27
ARB20	96	11937	8107	9840	2.89	2.90
ARB21	96	11265	8794	10445	2.98	2.98
ARB22	96	11419	8933	10363	2.98	2.94
ARB23	96	4647	8043	8094	4.65	4.63
ARB24	97	9789	8234	8650	3.30	3.10
ARB25	98	14091	9179	9421	2.63	2.70
ARB26	98	10600	8964	9141	3.17	2.98
ARB27	98	11163	7878	8081	3.06	2.93
ARB28	98	12317	6916	7532	2.86	2.84
ARB29	98	12672	8631	9432	2.78	2.84
ARB30	98	12366	9314	9694	2.89	2.80