

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMIA

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DENSIDAD Y MÓDULO DE
ELASTICIDAD DE CLONES DE *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) MEDIANTE
MÉTODOS DIRECTOS Y SU CORRELACIÓN CON MÉTODOS INDIRECTOS

por

Agustín INTHAMOUSSU PEREYRA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2010

Tesis aprobada por:

Director: _____

Ing. Agr. Prof. Carlos Mantero

Ing. Agr. Maria O'Neill

Per. Agr. Hugo O'Neill

Fecha: _____

Autor: _____

Agustin Inthamoussu

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi novia Valentina por su paciencia, apoyo y motivación que me dio para que pudiera terminar este trabajo antes de irnos a vivir a Suecia.

En general quisiera agradecer a todo las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo. A María O'Neill y al personal de COFUSA por darme la oportunidad de terminar mi carrera con esta tesis.

A Hugo O'Neill y Carlos Mantero por su constante asesoramiento y apoyo en cuestiones técnicas del trabajo, mucho más de lo esperado en un tutor.

Por último a mi familia, con la que siempre puedo contar con su apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISION BIBLIOGRAFICA</u>	3
2.1. DENSIDAD BÁSICA.....	3
2.1.1. <u>Variación entre árboles</u>	3
2.1.2. <u>Variación ambiental</u>	4
2.1.3. <u>Variación con la edad</u>	4
2.2. DENSIDAD BÁSICA Y MEDICIÓN POR MÉTODOS DIRECTOS	4
2.3. DENSIDAD BÁSICA Y MEDICIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS	5
2.3.1. <u>Punto de muestreo</u>	6
2.3.2. <u>Cantidad de medidas necesarias</u>	6
2.3.3. <u>Correlaciones entre Pilodyn y densidad básica</u>	6
2.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	7
2.4.1. <u>Módulo de elasticidad según la edad</u>	9
2.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MEDICIÓN POR MÉTODOS DIRECTOS	9
2.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MEDICIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS	10
2.6.1. <u>Correlación entre Fakopp y MOE</u>	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	12
3.1. MATERIALES.....	12
3.1.1. <u>Características del material experimental</u>	12
3.1.2. <u>Distribución geográfica de las parcelas</u>	14
3.1.3. <u>Características del sitio</u>	16
3.1.3.1. Características edafológicas y geológicas	16
3.1.3.2. Características climáticas	19
3.2. MÉTODOS.....	20
3.2.1. <u>Trabajo de campo</u>	20
3.2.1.1. Determinación de la penetración del Pilodyn.....	21
3.2.1.2. Determinación del MOE con Fakopp.....	22
3.2.2. <u>Trabajo de laboratorio</u>	23
3.2.2.1. Determinación de la densidad básica	23
3.2.2.2. Determinación del Módulo de Elasticidad	24
4. <u>RESULTADOS</u>	25
4.1. DIÁMETRO.....	25
4.2. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO DIRECTO.....	27
4.2.1. <u>Densidad básica según la edad</u>	29
4.2.2. <u>Análisis de varianza de densidad según la edad</u>	30

4.2.2.1. Plantaciones realizadas en el 2002	30
4.2.2.2. Plantaciones realizadas en el 2003	31
4.2.2.3. Plantaciones realizadas en el 2004	32
4.3. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO INDIRECTO: PILODYN.....	33
4.3.1. <u>Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad</u>	33
4.3.1.1. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según la edad	35
4.3.1.2. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según el nivel de densidad.....	37
4.3.1.3. Correlación entre densidad básica y Pilodyn según el valor de Pilodyn.....	40
4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DIRECTO	41
4.4.1. <u>Análisis de varianza del Módulo de Elasticidad según la edad</u>	43
4.4.1.1. Plantaciones realizadas en el 2002	43
4.4.1.2. Plantaciones realizadas en el 2003	45
4.4.1.3. Plantaciones realizadas en el 2004	45
4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO INDIRECTO:	
FAKOPP.....	46
4.5.1. <u>Fakopp según la edad</u>	47
4.5.2. <u>Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad</u>	48
4.5.2.1. Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad según la edad.....	49
4.5.2.2. Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad según el nivel de MOE	51
4.5.2.3. Correlación entre MOE y Fakopp según el valor de Fakopp	52
4.6. RANKING DE CLONES.....	54
5. <u>DISCUSIÓN</u>	56
5.1. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO DIRECTO.....	56
5.2. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO INDIRECTO Y NO DESTRUCTIVO	56
5.3. CORRELACIÓN ENTRE MEDICIÓN DIRECTA E INDIRECTA DE LA DENSIDAD	57
5.3.1. <u>Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según la edad</u>	58
5.3.2. <u>Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según el nivel de densidad</u>	59
5.3.3. <u>Correlación entre densidad básica y Pilodyn según el valor de Pilodyn</u>	60
5.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DIRECTO	60
5.4.1.MOE por edad.....	60
5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO INDIRECTO:	
FAKOPP.....	61

5.5.1.	<u>Correlación entre medición directa e indirecta del MOE</u>	61
5.5.2.	<u>Coeficiente de correlación entre medición directa e indirecta del MOE según la edad</u>	62
5.5.3.	<u>Correlación entre medición directa e indirecta del MOE según el nivel de MOE</u>	62
5.5.4.	<u>Correlación entre MOE y Fakopp según el valor de Fakopp</u>	63
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	64
7.	<u>RESUMEN</u>	66
8.	<u>SUMMARY</u>	67
9.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	68
10.	<u>ANEXOS</u>	76

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Clones evaluados	13
2. Distribución estacional y total de las precipitaciones (mm) durante el período de crecimiento de los clones	20
3. Temperaturas medias (°C) durante el período de crecimiento de los ensayos.	20
4. Valores de densidad promedio total	27
5. Densidad básica de todos los clones y diferencias significativas.....	28
6. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2002	30
7. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2003	31
8. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2004	32
9. Valores resumen de Pilodyn para todos los árboles medidos.....	33
10. Correlación de Pearson entre densidad básica y Pilodyn	34
11. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2002.	36
12. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2003.	36
13. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2004.	37
14. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “alta”	38
15. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “baja”	38
16. Correlación entre densidad básica y Pilodyn según tipos de densidad (criterio de clasificación 2)	39
17. Valores de probabilidad al utilizar el Pilodyn para encontrar un valor de densidad mayor a la media.....	40
18. Valores de probabilidad al utilizar el Pilodyn para encontrar un valor de densidad mayor a la media.....	41
19. Módulo de Elasticidad según orientación para todos los clones	41

20. Densidad básica de todos los clones y diferencias significativas.....	41
21. Clasificación de los clones (promedio de árboles) según normas JAS	43
22. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2002.....	44
23. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2003.....	45
24. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2004.....	46
25. Valores resumen de Fakopp para todos los árboles medidos.	47
26. Valores resumen de Fakopp según la edad de los clones medidos.	47
27. Correlación de Pearson entre método directo e indirecto de medición del MOE	48
28. Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2002.	49
29. Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2003.	50
30. Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2004.	50
31. Coeficiente de correlación de Pearson entre la Módulo de Elasticidad (N/mm ²) y Fakopp (N/mm ²) para el grado de densidad “alta”	51
32. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm ³) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “baja”	52
33. Valores de probabilidad al utilizar el Fakopp para encontrar un valor de MOE menor a la media	53
34. Valores de probabilidad al utilizar el Fakopp para encontrar un valor de MOE mayor a la media	53
35. Ranking de clones según el valor de densidad básica y MOE	55

Figura No.

1. Ubicación geográfica de la zona de muestreo	14
2. Ubicación detallada del lugar de muestreo.....	15
3. Vista de las plantaciones muestreadas.....	16
4. Unidades de suelo del Uruguay según Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, escala 1/1.000.000.....	17
5. Padrones “Picanzo”, “Los Silos” y “Capón Alto” y suelos CO.N.E.A.T	18
6. Tipo de suelos CONEAT presente en el área de muestreo “Boldrini”.....	19

7. Toma de datos con Pilodyn	21
8. Diagrama representativo de la medición indirecta con Fakopp	23
9. Ensayo de Módulo de Elasticidad por flexión estática.....	24

Gráfico No.

1. Diámetros de los clones evaluados según la edad	26
2. Relación entre edad y DAP.	27
3. Correlaciones entre densidad básica y Pilodyn	35
4. Correlación entre densidad básica y Pilodyn para densidades “altas”	38
5. Correlación entre densidad básica y Pilodyn para densidades “bajas”	39
6. Correlación entre medición directa e indirecta del MOE	49
7. Correlación entre Módulo de Elasticidad “alta” y Fakopp.....	51
8. Correlación entre MOE “baja” y Fakopp	52
9. Análisis de la densidad y MOE para todos los clones.....	54

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1975 a la fecha ha habido un constante incremento de la cantidad de bosques implantados pasando de 39.000 hectáreas a casi 1.000.000 de hectáreas forestadas en 2010, donde el género *Eucalyptus* representa más del 65% de dicha superficie según la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. La mayor parte de esta superficie se destina principalmente a la elaboración de pasta de celulosa, pero también para productos de madera de sólida.

En el año 2007 el gobierno uruguayo, con el objetivo de incrementar la mano de obra en el campo o la actividad industrial, comienza a incentivar el manejo silvicultural intensivo en los bosques a través de la exoneración de contribución inmobiliaria a toda la superficie bajo “proyectos de madera de calidad” (Ley 18.245). Este tipo de proyectos se define como bosques de rendimiento que fueran sometidos a sistemas de manejo con podas y raleos para la obtención de madera libre de nudos, con el objetivo final de aserrado, debobinado o faqueado, y que en el corte final tengan entre 100 y 450 árboles por hectárea y más de 15 años de plantados (Decreto del 22 de enero del 2008). La madera producto del manejo y parte de la cosecha final puede tener cualquier destino pero en la cosecha final la madera con fines aserrables, o de producción de chapas no puede ser inferior al 20% (veinte por ciento) de la cosecha total.

Compañía Forestal Uruguay S.A. (COFUSA) ha sido la empresa que proporcionó los materiales e infraestructura para realizar esta tesis con el objetivo de obtener mi título de Ingeniero Agrónomo. COFUSA es considerada como una empresa pionera en el sector y siempre se ha volcado a la producción de madera de calidad cuyo destino final es el aserrado, a efectos de producir tablas que se comercializan con mayor valor agregado.

Su estratégica ubicación en los departamentos de Tacuarembó y Rivera, sobre suelos de prioridad forestal y de baja productividad ganadera, ha creado un polo industrial en torno a la generación de madera en rectos fustes y de gran diámetro en base a rotaciones de entre 15 y 20 años, muy por encima de la práctica habitual en plantaciones para la generación de madera para celulosa.

COFUSA cuenta con un Programas de Mejoramiento Genético forestal que usa la clonación como herramienta para replicar los árboles plus. Este programa tiene como principal objetivo aumentar los niveles de producción de madera, encontrar variedades tolerantes a condiciones climáticas adversas (inviernos con frecuentes heladas y veranos con intensas sequías) y obtener árboles tolerantes a las cambiantes y diversas plagas y enfermedades.

Sin perjuicio de que muchas especies se han probado -y se continúa analizando al día de hoy- el *Eucalyptus grandis* es la especie elegida para este tipo de producción en suelos de baja productividad, con superiores y muy buenos resultados y capaz de ser clonado fácilmente.

En esta empresa el mejoramiento genético es constante y los resultados deben hallarse antes de alcanzar el tiempo máximo del período de rotación o, de lo contrario, supondría demasiado tiempo perdido. Es por eso que COFUSA ha buscado evaluar algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de sus clones a edades tempranas para luego saber su relación con las mismas propiedades físicas de la madera a edades adultas y cercanas a turno final.

El objetivo de estas tesis fue evaluar los 26 mejores clones de la empresa COFUSA, previamente elegidos según el criterio de rendimiento en madera por hectárea teniendo habiendo tomado en cuenta diferentes sitios: altos, bajos y chacras. Como ya se conocen la propiedad rendimiento volumétrico, en este momento se desea conocer otras propiedades. La evaluación se basó en la propiedad física de densidad a través de medición en discos (método destructivo) y la propiedad mecánica de Módulo de Elasticidad (MOE) medida en Máquina Universal de ensayos (método destructivo). A su vez, se estudió la correlación existente entre mediciones destructivas y no destructivas de estas propiedades. Para el estudio no destructivo de la densidad se utilizó el Pilodyn y para el MOE se utilizó el Fakkop.

Luego de obtenido los resultados de estas dos propiedades se determinó el ranking de mejores clones en base a ambas propiedades.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. DENSIDAD BÁSICA

El conocimiento de la cantidad de sustancia sólida que forma las paredes es de gran importancia para la producción de madera con destino para la elaboración de productos de madera sólida. La densidad entonces constituye un buen indicador de sus propiedades mecánicas, características de trabajabilidad, comportamiento durante el secado, propiedades eléctricas, térmicas y acústicas, según Tuset y Durán (2008).

Es una propiedad muy importante de la madera, ligada estrechamente a su resistencia mecánica. La densidad básica toma en cuenta el volumen y el peso de la madera con poros, según Tuset y Durán (2008).

El efecto de la densidad de la madera en los productos de aserrado se debe al hecho de que existe una alta correlación entre la densidad y la resistencia máxima a diferentes esfuerzos. La mayor densidad significa que hay más masa en un mismo volumen, por lo tanto hay mayor cantidad de producto y las propiedades mecánicas incrementan su valor. Las propiedades mecánicas como MOE, Módulo de Rotura (MOR), y compresión paralela y perpendicular al grano, se incrementan al aumentar la densidad de la madera (Haygren y Bawyer, 1996).

Esta propiedad es de gran importancia económica y de las mas heredables; por lo tanto, es altamente deseable incluirla (en combinación con otras: crecimiento, calidad, resistencia, etc.) en programas de mejoramiento genético (Fernández, 2004)

Achugar y Scaglione (2003) determinaron que los valores de densidad básica para árboles de *Eucalyptus grandis* es de 0,43 g/cm³ (4,7 años), 0,45 g/cm³ (5,7 años) y 0,49 g/cm³ (6,7 años).

Fernández (2004) determinó que la densidad media a la altura del pecho de clones de 2 y 3 años de *Eucalyptus grandis* plantados en la misma zona de estudio de este trabajo fue de 0,367 g/cm³

2.1.1. Variación entre árboles

Downes et al., citados por Fernández (2004) asevera que la variación entre los árboles es una de las mayores fuentes de variación en la densidad básica y ésta corresponde tanto a factores ambientales como genéticos.

Lima et al. (2001), trabajando con siete clones de *Eucalyptus grandis* de distintas edades, encontraron una tendencia de aumento de densidad básica a medida que

se incrementa la edad de los clones. La variación dentro de los clones (intra-clonal) toma valores bajos, típico del material clonal. Los coeficientes de variación inter-clonales permanecieron relativamente constantes con la edad, lo que indica que la variación de la densidad de la madera en diferentes materiales genéticos (clones), tiende a permanecer relativamente constante con el avance de la edad (siempre y cuando el sitio sea homogéneo).

2.1.2. Variación ambiental

El desempeño de un clon o un grupo de clones no puede extrapolarse de un sitio a otro, la interacción genotipo por ambiente puede determinar que un genotipo tenga buen comportamiento en un sitio pero no en otro. Si se desea obtener el máximo progreso genético en programas de mejoramiento, hay que tener en cuenta ese factor (Zobel, 1988).

Estudios realizados por García et al. (2006) aseguran que la velocidad de crecimiento no influye en las propiedades densidad, MOE, módulo de rotura. Se puede seleccionar árboles de mayor velocidad de crecimiento sin ir en contra de estas propiedades. La velocidad de crecimiento está influenciada por el ambiente.

2.1.3. Variación con la edad

La densidad de la madera varía según la edad del árbol, a mayor edad más alta es la densidad. La capacidad de conocer y manejar la densidad de la madera a edades tempranas podría mejorar y acelerar el proceso de mejoramiento genético.

Lima et al. (2001), Achugar y Scaglione (2003) encontraron que existe una tendencia de la densidad a aumentar con la edad de los clones.

Según Finocchietti (2005) trabajando con *Eucalyptus grandis*, los resultados obtenidos para la densidad básica y la edad muestran un aumento del 12% de la densidad promedio de un árbol, desde los 4 a los 8 años.

2.2. DENSIDAD BÁSICA Y MEDICIÓN POR MÉTODOS DIRECTOS

La forma más precisa de determinar la densidad de la madera es mediante ensayos destructivos.

Greaves et al. (1995) observaron una fuerte correlación linear entre la densidad al DAP y la densidad completa del árbol ($r=0,99$). Este resultado indica que la densidad

al DAP es un indicador preciso de la densidad real del árbol, siendo relativamente independiente de la familia y el sitio.

Achugar y Scaglione (2003) concluyen que el punto óptimo de muestreo depende de la edad y el material genético. El DAP resultó un punto de muestreo altamente correlacionado con la densidad promedio para el intervalo de edad entre 3,2 y 5,7 años para clones de *Eucalyptus grandis*.

2.3. DENSIDAD BÁSICA Y MEDICIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS

La medición de la densidad de la madera por métodos directos es una manera de determinar esa propiedad de manera exacta y sin errores. Pero implica la destrucción total o parcial del material a medir. La medida más directa y exacta se logra con la medición de densidad a través de probetas tomadas de los árboles apeados. Pero existen formas de medir esta propiedad sin llegar a destruir el árbol, formas indirectas y no destructivas que se pueden correlacionar con el valor real de la densidad. Una vez obtenida la correlación y sabiendo que es alta y casi lineal, se puede seguir utilizando los valores indirectos sin destruir el árbol para saber el valor de densidad, según Tuset y Durán (2008).

El Pilodyn es un equipo de fabricación suiza que penetra la madera con un émbolo de acero de 2,5mm de diámetro mediante un impacto de 6 Joules ejercido por un resorte. Se mide la profundidad de penetración en milímetros, la profundidad máxima de penetración es de 40mm. La profundidad alcanzada es inversamente proporcional a la densidad de la madera (Tuset y Durán, 2008).

El instrumento es portátil y fue desarrollado para estimar el grado de degradación biológica en piezas de madera en obra. Puede ser utilizado también para estimar la dureza Janka y el peso específico aparente de piezas de madera y aún de árboles en pie. La utilización del Pilodyn para estimar estas propiedades provee un método de trabajo sencillo, rápido y no destructivo que se está utilizando mucho, en especial en la selección de árboles por el peso específico aparente básico de su madera (Tuset y Durán, 2008).

López et al. (2002) concluyen que la incorporación de mediciones realizadas con Pilodyn permitirá diferenciar familias o grupos de individuos de alta, media o baja densidad de la madera lo cual proporcionará un significativo aporte a las estrategias del Programa de Mejoramiento Genético.

Fernández (2004) también concluye que cuando mayor es la densidad media, más alta es la correlación que se obtiene entre esta variable y el Pilodyn. También se puede apreciar que no existe correlación entre la densidad media del árbol y la densidad de la zona medular; los árboles que poseen las mayores densidades medias no tienen porqué ser los que tengan las mayores densidades en la zona periférica.

2.3.1. Punto de muestreo

Achugar y Scaglione (2003) concluyen que los resultados obtenidos en cuanto al uso del Pilodyn, como un instrumento de determinación no destructivo de la densidad básica, mostraron una correlación alta y negativa entre la densidad básica promedio del árbol y la penetración del Pilodyn al DAP. Los valores de correlación obtenidos fueron -0,678 y -0,615 para dos clones distintos. Dentro del rango de edades estudiado (2,2 a 6,7 años) el Pilodyn tendría mayor poder predictivo para la edad de 6,7 años de un clon y para las edades inferiores de ambos clones.

En un estudio de correlaciones del Pilodyn con la densidad de la madera en árboles *Eucalyptus grandis* de 9 – 11 cm de DAP en Uruguay (localidad Tres Bocas), se obtuvieron valores de correlación del Pilodyn de -0,84 y -0,81 con la densidad del árbol promedio y la densidad al DAP respectivamente. Se concluyó que las medidas de Pilodyn podrían realizarse en cualquier época del año, ya que no hubo diferencias significativas entre las medidas de Pilodyn realizadas en diferentes estaciones del año (De León, Centurión, citados por Achugar y Scaglione, 2003).

Finocchietti (2005) haciendo referencia al punto de muestreo, para árboles de 4 años, la zona de muestreo se encuentra entre el DAP y los 5 metros de altura, tomándose como punto de muestro a 1,3 m por practicidad ($r=0,933$).

2.3.2. Cantidad de medidas necesarias

Las medidas con Pilodyn son fáciles de hacer y la principal ventaja del método es que permite realizar mediciones en todos los árboles de la parcela. Se recomienda por lo menos 2 medidas por árbol para obtener resultados confiables (Hansen, 2000).

Greaves et al. (1995) concluye que debido a la alta heredabilidad y repetitividad de la penetración del Pilodyn, dos medidas serían suficientes para la selección, dos observaciones resultan en un aumento de la precisión de selección del 8% con respecto a la toma de una sola observación. Dos observaciones por árbol brindan el 94% de la máxima precisión obtenible en la selección.

2.3.3. Correlaciones entre Pilodyn y densidad básica

Pérez (2001) trabajando con *Eucalyptus grandis* de 16 años en Rivera, encontró una correlación entre densidad y penetración de Pilodyn de -0,836 con 93 muestras.

Böthig (2001) determinó un valor de correlación para densidad y Pilodyn de -0,84. Este valor corresponde a un valor de relación potencial.

De Mello et al. (2002), trabajando con *Eucalyptus grandis* de 10 años de edad en el departamento de Rivera, encontraron que el punto más externo al árbol fue el que se correlacionó mejor con la medida del Pilodyn ($r = -0,837$).

Doldan (2003), trabajando con *Eucalyptus grandis* de 18 años de edad, en Río Negro, obtuvo una correlación de $-0,79$ entre la densidad y la penetración del Pilodyn, la correlación fue mayor ($-0,84$) con las probetas cercanas a la corteza.

Valores obtenidos por Achugar y Scaglione (2003) indican un valor de correlación total de $-0,678$. No existieron diferencias significativas en la correlación entre la densidad básica promedio y Pilodyn medido al DAP por clon según la edad.

Según Fernández (2004) los resultados obtenidos en cuanto al uso del Pilodyn, como instrumento de determinación no destructivo de la densidad básica, muestran una correlación alta y negativa entre la densidad básica promedio del árbol y la penetración del Pilodyn al DAP. Para dos ensayos distintos con *Eucalyptus grandis* los valores de correlación entre la densidad media y la penetración al Pilodyn fueron de $-0,800$ y $-0,813$.

Böthig (2001) nos dice que las variaciones de densidad o de dureza provocarán diferente cambio en la profundidad de penetración con el Pilodyn dependiendo del rango de trabajo; a menor densidad de la madera, la sensibilidad de la medida del Pilodyn será mayor. Para simplificar la aplicación práctica del Pilodyn, se proponen dos rangos de trabajo, uno por encima del promedio y otro por debajo del mismo. Se realizan regresiones lineales para la correlación en esos dos grupos. Se espera que el grupo de densidades más bajas, la correlación debe ser más alta debido a que a densidades menores la sensibilidad del método es mayor. Los valores encontrados fueron $-0,67$ para el grupo de altas densidades y $-0,69$ para el grupo de densidades bajas.

Finocchietti (2005) concluye que los resultados obtenidos con Pilodyn muestran una correlación alta y negativa entre la densidad básica promedio al DAP y la penetración de este instrumento a igual altura. Los valores de correlación obtenidos fueron de $-0,87$ y $-0,66$ para *Eucalyptus grandis* a los 4 y 8 años respectivamente.

2.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Según Tuset y Durán (2008), las propiedades mecánicas de la madera indican el comportamiento que puede esperarse de este material, cuando sobre él actúan cargas o sollicitaciones externas. Los ensayos de propiedades mecánicas, por lo común se hacen sobre probetas de ensayo de dos tamaños diferentes: por un lado, probetas pequeñas libres de defectos; por otro lado, probetas de tamaño de obra, o sea con la sección transversal que realmente llevarán en la construcción.

Continúan diciendo Tuset y Durán (2008), que cuando un cuerpo rígido es sometido a esfuerzos externos, estos esfuerzos cambian la forma y el tamaño del cuerpo. Mientras la carga aplicada no supere el límite proporcional, existe una correlación lineal entre la carga aplicada y la deformación provocada, aumentos iguales de la carga producen deformaciones también iguales. Si se retira la carga aplicada durante este momento, la probeta retoma su posición original. Una vez superado el límite proporcional, las deformaciones son cada vez mayores para un mismo incremento en la carga y la probeta no retorna a su posición original sino que se deforma. Incluso puede llegar a la carga de ruptura de la probeta cuando ésta falla. Hasta la carga en el límite proporcional, la correlación entre la carga y la deformación, es una constante denominada MOE. En maderas, es usual determinar el MOE a partir de un ensayo de flexión estática, que es más fácil de realizar y se adapta mejor a las situaciones reales de trabajo.

El presente estudio se basó en esta premisa para realizar el ensayo de MOE.

$$MOE = \frac{\Delta p \times l^3}{4 \times \Delta d \times b \times h^3} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Siendo

Δp = es la diferencia entre dos puntos P1 y P2 cualquiera de la recta de la zona elástica, en N

l = luz entre apoyos, mm

Δd = es la diferencia entre las flechas o deformación correspondiente a las cargas elegidas, d1 y d2, mm

b = ancho de la probeta, mm

h = altura de la probeta, mm

Pérez del Castillo et al. (2003) determinaron el valor medio de MOE para madera de *Eucalyptus grandis* en 12.524 MPa en un rango de 12.108 MPa a 12.940 MPa con un intervalo de confianza de 90% la misma zona de estudio del presente trabajo.

2.4.1. Módulo de elasticidad según la edad

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

De Castro Silva et al., citados por Serrentino et al. (2006) encontraron correlaciones positivas entre la edad de los árboles y las propiedades mecánicas (MOE y MOR).

Serrentino et al. (2006), determinaron el MOE para 3 grupos de árboles según la edad. 24 árboles menores a 8 años obtuvieron un promedio de 8.843MPa, 40 árboles entre 8 y 14 años promediaron 8.099MPa y 44 clones mayores a 14 años tuvieron un promedio de 10.069MPa.

2.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MEDICIÓN POR MÉTODOS DIRECTOS

La forma más directa y precisa para medir el MOE es mediante probetas y de modo destructivo, de igual modo que para el estudio de la densidad básica mencionada con anterioridad.

El laboratorio Tecnológico del Uruguay ha realizado investigaciones sobre el MOE, parámetro que se puede determinar por el método de “cargas muertas” o “flexión estática con pesas” y que tiene una alta correlación con el Módulo de Rotura. Se ensayaron métodos factibles y prácticos para medir el MOE en aserraderos o en depósitos de madera y se realizó una comparación con varios métodos no-destructivos. La mayoría de los estudios sobre la medición del MOE y su correlación entre métodos destructivos y no destructivos se realizan sobre maderas o tablas elaboradas y prontas para la venta. Se llama medición por métodos no destructivos cuando se utiliza algún equipo de medición por ondas o impulsos que no inutilicen estas maderas y métodos destructivos al método por cargas muertas que deja a las tablas inutilizables, según el Informe de Investigación del LATU-JICA (mayo 2000).

Pérez (2001) determinó que el valor de MOE medido en flexión estática para árboles de *Eucalyptus grandis* de 16 años y medio de edad es de 11.300 N/mm², con un coeficiente de variación de 16,9%.

Pérez et al. (2003) también determinaron que el MOE sobre pequeñas probetas libres de defectos fue de 11.338 N/mm² en árboles de *Eucalyptus grandis* de 16 años de edad.

El MOE determinado en ensayos de pequeñas probetas libres de defectos (O'Neill et al., 2004) de árboles de *Eucalyptus grandis* de 12 años fue de 11.766 N/mm².

Lima et al. (2000) determinaron en clones de 8 años de edad de *Eucalyptus grandis*, un valor de 9,754 MPa.

Serrentino et al. (2006) determinaron que el promedio de MOE para árboles plus de *Eucalyptus grandis* entre 7 y 22 años es de 8.381, 8.836 y 9.082 MPa según la posición de la probeta (cercana o lejana a la médula).

2.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MEDICIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS

Se trabajó con el dispositivo portátil denominado “Microsecond Timer” de la empresa húngara Fakopp, que es un equipo de ondas de impacto para madera. Este dispositivo utiliza el principio de transmisión directa de una onda acústica y calcula el tiempo de propagación de dicha onda entre dos puntos de distancia conocida.

El Fakopp es un método de ensayo indirecto y no destructivo utilizado para el cálculo del MOE. La madera de un árbol en buenas condiciones es un buen trasmisor de onda mientras que la madera de árboles que, por alguna razón, no se encuentran en condiciones óptimas, absorbe sonidos en lugar de transmitirlos; a su vez la velocidad de la onda en maderas sanas es mucho mayor. Se define una línea en el árbol por dos transmisores, uno de inicio y otro de fin. Si la línea definida por los transmisores interfiere con algún defecto, las ondas lo evitan. El efecto del contenido de humedad es importante por debajo del punto de saturación de las fibras (28-30% aproximadamente), por encima de ese punto la velocidad no cambia demasiado porque las fibras son responsables de la propagación de la onda (Fernández, 2004) y gran parte de la onda se transmite por el agua. Un árbol en pie no tendría problemas de humedad para ser medido por Fakopp.

Teniendo en cuenta que el dispositivo nos muestra en tiempo que demora la onda en llegar del sensor emisor al receptor en microsegundos, la fórmula para el cálculo del MOE es la siguiente, según Pérez et al. (2000):

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

donde:

Et-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, que en este caso será la densidad del árbol en pie: verde

Además, sobre el punto de saturación de las fibras, la variación del contenido de humedad no afecta las propiedades elásticas y de resistencia. Por debajo de este

punto, ocurre contracción e hinchamiento incrementando o reduciendo la cohesión y la rigidez según Kollmann, Coté, citados por Pérez del Castillo (2001).

Fernández (2004) determinó valores promedios altos de MOE para clones de *Eucalyptus grandis* de 5 años de edad, 10.022 N/mm² para un ensayo en el departamento de Rivera.

2.6.1. Correlación entre Fakopp y MOE

Pérez (2001) trabajando con madera de *Eucalyptus grandis*, correlacionó el MOE obtenido por flexión de 4 puntos con el MOE obtenido con equipos no destructivos (Fakopp, Silvatest, FFT Analyzer y Pundit) y encontró que el coeficiente de correlación es 0,692 para el MOE y otro método indirecto de medición de MOE. Con lo que concluye que los métodos no destructivos utilizados fueron apropiados para estimar las propiedades de flexión. El análisis fue realizado sobre tablas de gran tamaño y en madera de 16 años y medio de edad con 12% de humedad.

El mismo estudio de Pérez (2001) determina la correlación de MOE por Máquina universal y MOE por Fakopp en tablas de grandes dimensiones con un contenido de humedad de 26%. El valor de correlación entre ambas variables en tablas alejadas de la médula es 0,975.

García et al. (2006) observan buenas correlaciones entre la medición del en MOE a través de métodos no destructivos y destructivos en *Eucalyptus grandis*, lo cual es muy importante ya que permite estimar el valor de una propiedad mecánica importante a través de un método que no implica la destrucción de la muestra.

Serrentino et al. (2006) determinó un valor de 0,56 para la correlación de MOE por Máquina Universal y Fakopp en un grupo de árboles de distintas edades con un valor máximo de 18 años.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

- Instrumento de medición indirecta del MOE: Fakopp
- Martillo
- Saca bocado
- Pilodyn
- Nylon adherente
- Tabla de datos
- Forcípula
- Brújula

3.1.1. Características del material experimental

El material de estudio está ubicado en los establecimientos “Los Silos” y “Picanzo” (Ruta 27 km 25), “Capón Alto” (Ruta 27 km 38,5), y “Boldrini” (Ruta 5 km 488) de la empresa COFUSA, en el departamento de Rivera.

Son plantaciones comerciales de clones de *Eucalyptus grandis* plantados entre los años 2002 y 2004. El material utilizado proviene de un Programa de Mejoramiento Genético, que tiene como principal objetivos aumentar los niveles de producción de madera. Una vez alcanzados, la siguiente meta es conocer la densidad, MOE y MOR de sus árboles para seleccionar los mejores.

Cada uno de los clones evaluados (ver cuadro 1) fue tomado de estos 4 sitios distintos. Los 26 clones fueron elegidos de entre 350 clones, según su alto valor en un ranking de rendimiento volumétrico. Se eligió un año de plantación por cada uno de los clones, siempre el año de plantación más antiguo. De cada uno de los clones se toman 3 árboles, pero estos fueron promediados en un solo valor para obtener el valor de densidad o MOE por clon.

Los clones están plantados en pequeñas parcelas de 25 árboles con una densidad de 500 árboles por hectárea. Se encuentran en marcos de estudio bien delimitados dentro de las plantaciones comerciales de la empresa. Se cuenta con un sistema de información geográfico donde figuran las parcelas de estudio y además se encuentran marcadas en el terreno, ver figura 1, 2 y 3.

Cuadro 1. Clones evaluados

No.	Plantación	Clon	Establecimiento
1	Primavera 2002	B 23	Capón Alto
2	Primavera 2002	SM 1	Capón Alto
3	Primavera 2002	SM 24	Capón Alto
4	Primavera 2002	SM 27	Capón Alto
5	Primavera 2002	SM 31	Capón Alto
6	Primavera 2002	SS 10	Capón Alto
7	Primavera 2002	SS 12	Capón Alto
8	Primavera 2002	SS 13	Capón Alto
9	Primavera 2002	SS 16	Capón Alto
10	Primavera 2002	SS 20	Capón Alto
11	Primavera 2002	SS 22	Capón Alto
12	Primavera 2002	SS 9	Capón Alto
13	Primavera 2002	T 296	Capón Alto
Total clones 2002: 13			
14	Primavera 2003	B 6	Los Silos
15	Primavera 2003	SM 13	Los Silos
16	Primavera 2003	SS 17	Los Silos
17	Primavera 2003	SS 8	Los Silos
18	Primavera 2003	T 231	Los Silos
Total clones 2003: 5			
19	Primavera 2004	B 38	Picanzo
20	Primavera 2004	SS 1	Picanzo
21	Primavera 2004	SS 19	Picanzo
22	Primavera 2004	SS 24	Picanzo
23	Primavera 2004	SS 6	Boldrini
24	Primavera 2004	T 256	Picanzo
25	Primavera 2004	T 65	Picanzo
26	Primavera 2004	TT 775	Picanzo
Total clones 2004: 8			

Todos los clones fueron plantados en primavera y evaluados por el siguiente trabajo entre el 30 de agosto y el 1 de setiembre de 2008. A 2 meses de cumplir 6, 5 ó 4 años para los clones plantados en el 2002, 2003 ó 2004 respectivamente. Se considera que la edad de los clones en número enteros lo más cercano al valor exacto (6, 5 y 4).

3.1.2. Distribución geográfica de las parcelas



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de muestreo

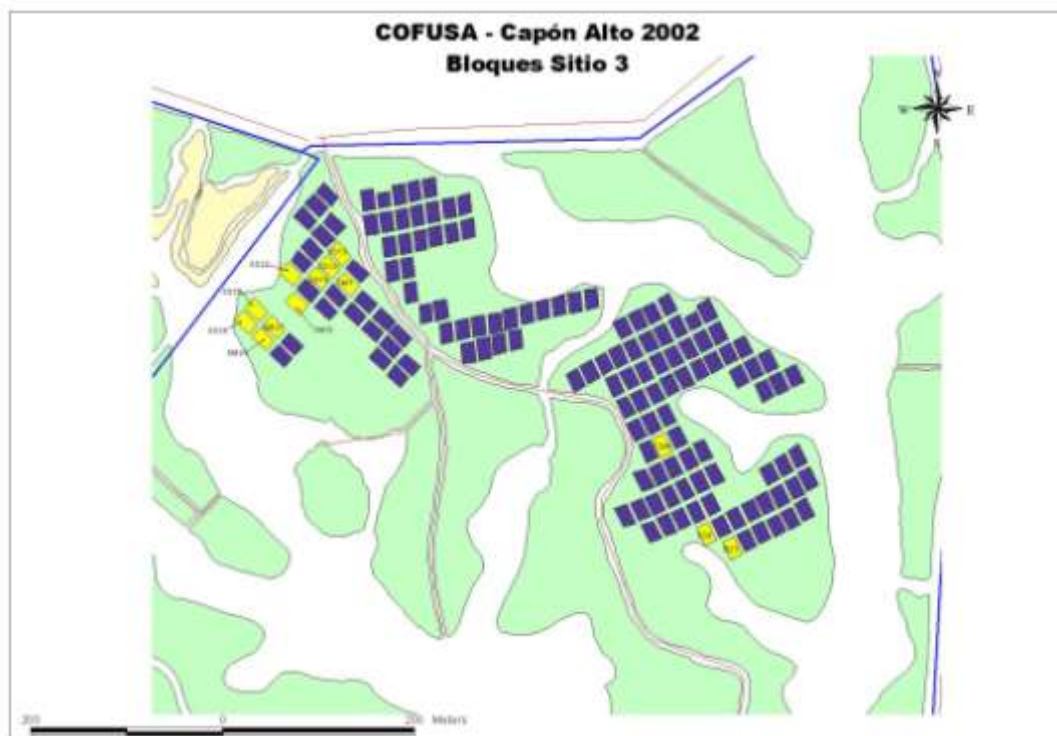


Figura 2. Ubicación detallada del lugar de muestreo

Cada uno de los cuadros azules o amarillos son parcelas que representan un solo clon. Estas parcelas o bloques no tienen un diseño estadístico específico, ya que no es un objetivo determinar las propiedades mecánicas o físicas en diferentes sitios.

Los clones amarillos en esta imagen corresponden a los clones estudiados dentro del establecimiento “Capón Alto”. Para este trabajo se analizaron 3 árboles por cada clon o lo que es lo mismo, 3 árboles por cada parcela.



Figura 3. Vista de las plantaciones muestreadas

3.1.3. Características del sitio

3.1.3.1. Características edafológicas y geológicas

Aunque parte del establecimiento “Capón Alto” se encuentra sobre la Unidad de Suelos Cuchilla Corrales, todo el material muestreado y evaluado fue obtenido sobre la Unidad Rivera según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1/1.000.000 de URUGUAY. MGAP (D.S.F.) como se puede ver en la figura 4.



Figura 4. Unidades de suelo del Uruguay según Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, escala 1/1.000.000

A su vez, los suelos pertenecen a la zona 7, Grupo CONEAT 7.2 y 7.31 (“Picanzo”, “Los Silos” y “Baldrini”) y 7.33 (“Capón Alto”), visibles en la figura 5 y 6. Según URUGUAY. MGAP. CONEAT (1994) el grupo 7.2 se localiza en toda el área de areniscas de Tacuarembó, ocupando las zonas de relieve más fuerte. El relieve lo forman colinas sedimentarias no rocosas con pendientes de 10 a 15% y el material geológico está constituido por areniscas de Tacuarembó. El grupo 7.31 se localiza en los alrededores de la ciudad de Rivera, sobre las rutas 5, 27 y 30, hasta Tranqueras. El material geológico lo forman areniscas rojas, poco litificadas, apoyadas sobre areniscas de Tacuarembó. El relieve está constituido por colinas sedimentarias no rocosas, con pendientes de 6-10%. El grupo 7.33 se localiza principalmente entre los Arroyos Ataques, Mangueras, la ruta 27 y la frontera con Brasil. El material geológico está

constituido por areniscas de Yaguarí o sedimentos arenosos apoyados sobre dichas areniscas. El relieve está formado por colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes, con pendientes predominantes de alrededor de 5-6%.



Figura 5. Padrones “Picanzo”, “Los Silos” y “Capón Alto” y suelos CO.N.E.A.T

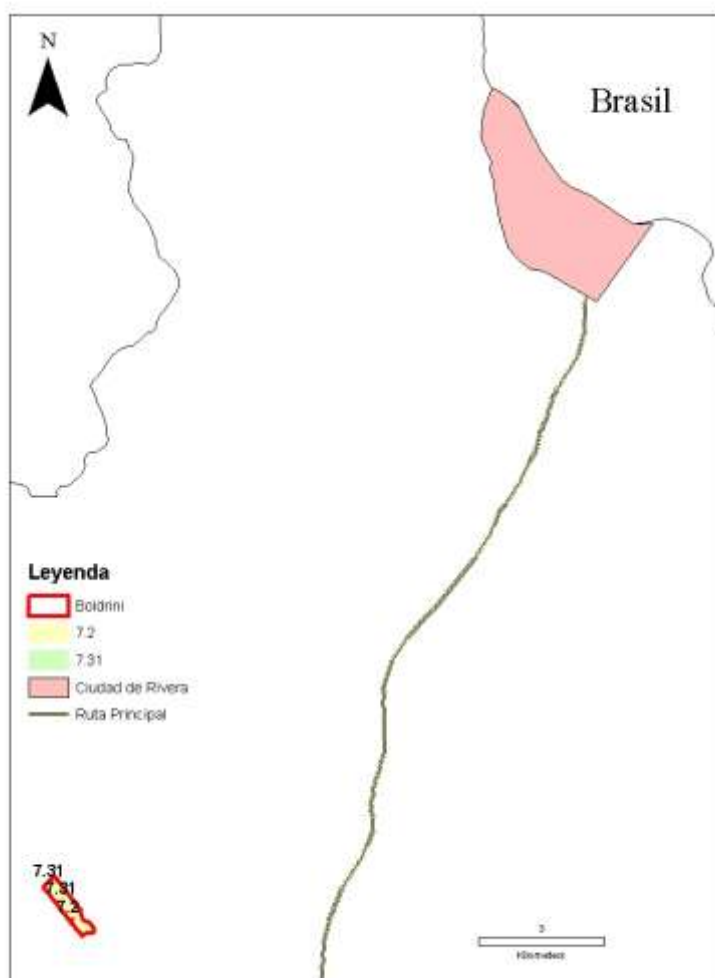


Figura 6. Tipo de suelos CONEAT presente en el área de muestreo "Boldrini"

3.1.3.2. Características climáticas

En el siguiente cuadro se observa la distribución estacional y anual de las precipitaciones observadas en el período de crecimiento de los árboles muestreados.

Cuadro 2. Distribución estacional y total de las precipitaciones (mm) durante el período de crecimiento de los clones

Año	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Media Anual
2002	562,7	784,9	133,0	1.316,7	2.797,3
2003	633,9	581,5	88,6	478,5	1.782,5
2004	141,1	207,3	122,2	358,9	829,5
2005	266,1	747,1	118,0	442,4	1.573,6
2006	219,3	269,8	79,7	354,1	922,9
2007	660,3	355,1	73,1	506,6	1.595,1
2008	183,1	346,8	36,8	420,1	986,8

La variable temperatura también tiene un importante efecto sobre el crecimiento. En el siguiente cuadro se observa la distribución estacional y anual de la temperatura media, mínima y máxima del período de crecimiento de los árboles muestreados.

Cuadro 3. Temperaturas medias (°C) durante el período de crecimiento de los ensayos.

Año	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Media Anual
2002	22,3	15,8	11,3	16,6	17,3
2003	22,3	14,6	13,7	15,3	16,7
2004	22,1	15,5	14,7	15,4	17,1
2005	23,2	16,2	12,3	16,0	17,5
2006	23,5	14,9	12,3	16,8	17,5
2007	22,5	15,0	15,3	15,0	16,9
2008	22,8	15,2	11,9	16,9	17,5

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Trabajo de campo

En el trabajo de campo se realizaron diversas mediciones de los clones evaluados. Debido a que la medición de la densidad utiliza para este trabajo fue destructiva, al obtener las muestras también se aprovechó a sacar el valor factor de forma de los árboles. Primero se midió la altura total y el diámetro a la altura del pecho y una vez apeado el árbol, se procedió a medir el diámetro cada 2 metros, la altura de la primera rama verde y la altura total.

La elección de los árboles dentro de cada clon se realizó al azar y una vez elegido se midió la penetración del émbolo en el fuste, MOE indirecto por Fakopp y se obtuvo un disco para medir la densidad básica en laboratorio.

3.2.1.1. Determinación de la penetración del Pilodyn

Dadas las características de sencillez, rapidez y precisión de la medición con el instrumento Pilodyn, se consideró para esta instancia la medición de 3 árboles de cada clon analizado en este trabajo.

Las mediciones se efectuaron en árboles en pie a la altura del pecho, previo retiro del ritidoma, de tal modo de influir en la penetración en la madera. A mayor penetración del émbolo, menor es la dureza o densidad de la madera. Las zonas donde se realizaron las mediciones fueron en un punto del fuste con dirección norte y otro punto al sur, sobre superficies planas y libres de defectos (ver figura 7). Se estudiará la correlación de este método con la densidad básica del árbol teniendo en cuenta el promedio de puntos cardinales para la toma de datos.

Las mediciones fueron registradas en planillas donde estaba diferenciado cada clon.

Figura 7 Toma de datos con Pilodyn



3.2.1.2. Determinación del MOE con Fakopp

Para la determinación indirecta del MOE se utilizó el instrumento Fakopp, que mide el tiempo de propagación de la onda entre dos puntos a una distancia conocida.

Se realizaron las mediciones teniendo en cuenta la dirección norte y sur del fuste, por lo tanto se tomaron dos medidas en cada uno de los 3 árboles de cada clon estudiado para disminuir el error de la medida.

Se seleccionó una zona del árbol libre de defectos y se marcaron dos puntos a una distancia de 1 m. Los puntos se determinaron de tal manera que las mediciones con Fakopp comprendieran la zona donde se usó el Pilodyn y que además permitieran obtener una probeta de 80 cm por sobre el DAP (ver figura 8).

De esta manera se puede correlacionar al MOE (N/mm^2) obtenido con el valor de densidad básica (g/cm^3).

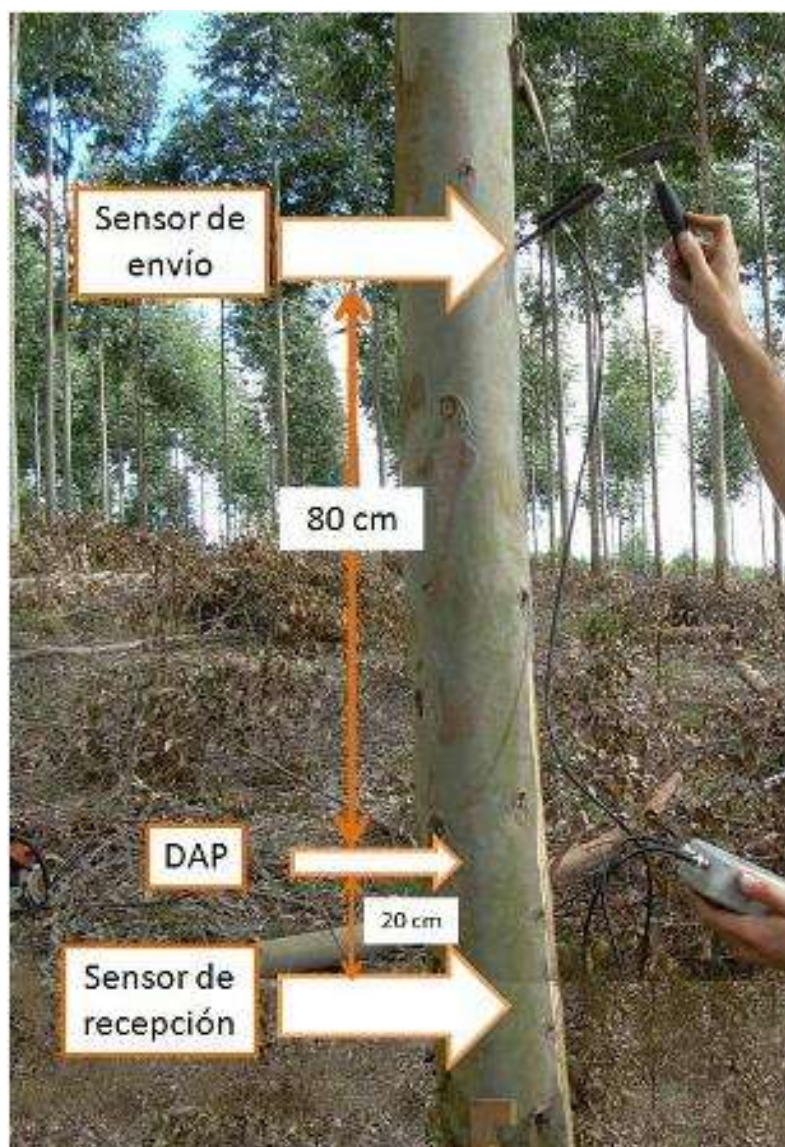


Figura 8. Diagrama representativo de la medición indirecta con Fakopp

3.2.2. Trabajo de laboratorio

3.2.2.1. Determinación de la densidad básica

Para la determinación de la densidad aparente básica de los discos obtenidos de los clones al DAP se siguió la metodología establecida en la Norma UNIT 237:2008 para la “Determinación de la densidad aparente en madera” con algunas modificaciones.

El cálculo de volumen se calcula como la diferencia entre la masa de un disco saturado de agua y el mismo disco sumergido en agua. La norma 237:2008 propone sellar los discos en parafina caliente para calcular el volumen de los mismos.

3.2.2.2. Determinación del Módulo de Elasticidad

El ensayo de flexión estática se realizó sobre probetas de 400 x 25 x 25 mm, en la Máquina universal, utilizando una celda de carga de 50 KN de capacidad, con una distancia de apoyos inferiores (span) de 350 mm, ejerciendo la carga en la cara tangencial más cercana a la médula y en el centro de la probeta (ver figura 9).

Para este ensayo se utilizó la norma UNIT 1137:2007.

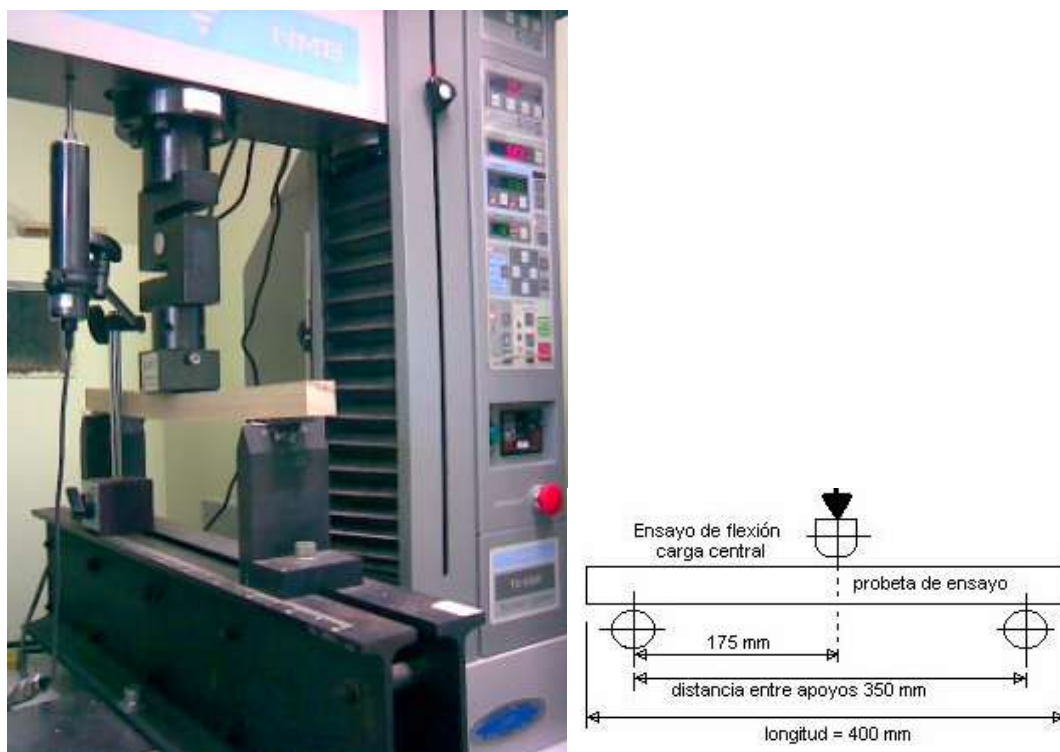


Figura 9. Ensayo de Módulo de Elasticidad por flexión estática.

4. RESULTADOS

Como el objetivo de estudio son las propiedades de los clones, los resultados presentados en este trabajo se basan en el promedio de todos los árboles para obtener un valor por clon.

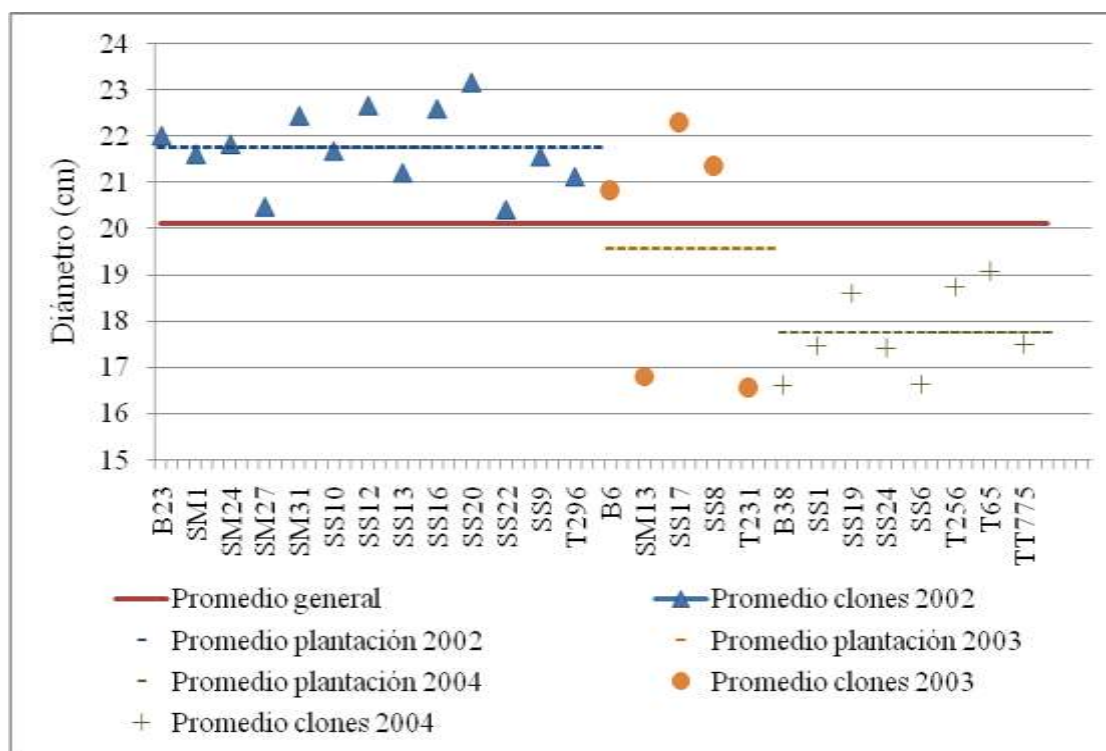
Al trabajar con clones, se asume que la variabilidad genética es nula y solo se considera al ambiente como un factor que genera variabilidad entre los clones. Pero como las muestras de los clones (cada uno de los árboles) fueron obtenidas en el mismo sitio, bajo el mismo clima y tipo de suelo, también se asume que la variabilidad debido al ambiente es muy baja.

Hay que remarcar que el análisis estadístico de todas las variables estudiadas: densidad básica, Pilodyn, MOE y Fakopp se realizan con los “promedios de valores” de cada uno de los árboles y no por clon. De hecho, no se podría realizar un análisis estadístico con un solo valor por clon.

En cada uno de las variables analizadas se determina el valor del coeficiente de variación como medida de dispersión de la propiedad tomando en cuenta el promedio de árboles (por clon) y se lo compara con el coeficiente de variación de la variable tomando en cuenta todos los árboles (sin promedio). Se demuestra que la agrupación de los árboles por clon reduce el coeficiente de variación en uno o dos puntos porcentuales.

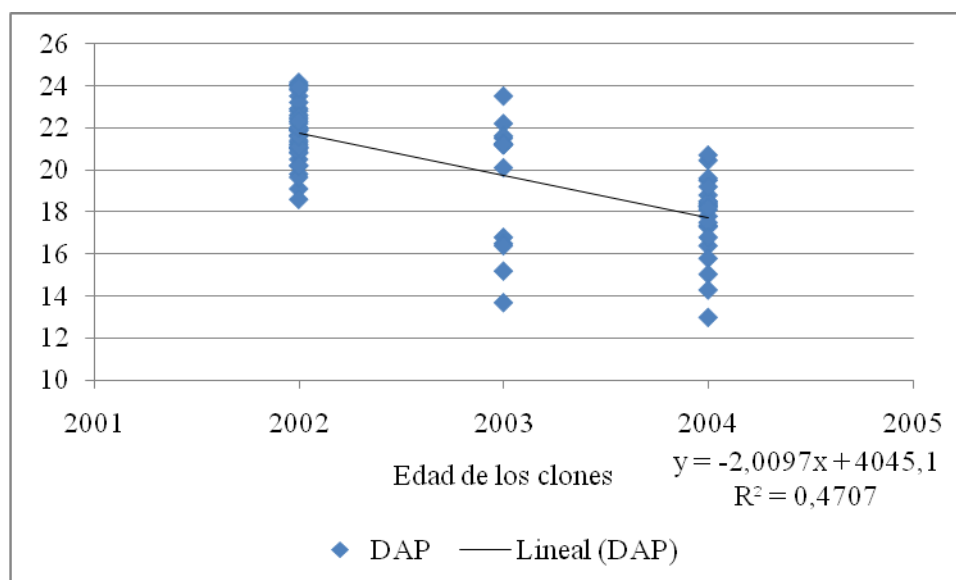
4.1. DIÁMETRO

Aunque no es una variable de relevancia para este trabajo, se detalla la distribución de los diámetros en el gráfico 1.

Gráfico 1. Diámetros de los clones evaluados según la edad

El coeficiente de variación de las 78 muestras (3 árboles por cada clon) es de 13%, mientras que la agrupación de los árboles por clon resulta en un coeficiente de variación de 11%.

Se puede ver que en términos generales, la edad de los clones está en concordancia con los valores de DAP obtenidos. De todos modos existen dos clones (SM 13 y T 231) pertenecientes a las plantaciones 2003 que se separan de la media. Éstos determinan que el coeficiente de variación para la variable DAP en el año 2003 sea de 13,7%. La plantación 2002 y 2004 tienen un coeficiente de variación de 3,8% y 5,3% respectivamente.

Gráfico 2. Relación entre edad y DAP.

En el gráfico anterior se puede ver la relación alta entre la edad de los clones y el diámetro de los mismos, $r=0,69$. Todos los análisis entre correlaciones de métodos directos e indirectos para medir o estimar la densidad y MOE de los clones estudiados, se realizarán teniendo como principal variable a la edad.

4.2. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO DIRECTO

La medición de la densidad básica de los clones fue realizada en laboratorio siguiendo la metodología descrita en el sub-capítulo 3.2.2.1. Los cálculos se realizaron sobre un disco de madera extraído a la altura del DAP de cada uno de los árboles.

Para el análisis de la densidad básica se utilizaron 26 clones.

Cuadro 4. Valores de densidad promedio total

No. de clones	Densidad básica					CV ** (%)
	Prom. (g/cm ³)	Mín. (g/cm ³)	Lím. inf.*	Lím. sup.*	Máx. (g/cm ³)	
26	0,369	0,319 (SM 31)	0,337	0,405	0,435 (B 6)	6,5%

* límite inferior y superior determinado por un 95% de confianza de la media

** coeficiente de variación

Cuando se analiza el valor de densidad básica por cada uno de los árboles (no agrupados por clones) se obtiene un valor promedio de la misma magnitud ($0,369 \text{ gr/cm}^3$) con un coeficiente de variación de 8,1%, solamente 1,6 puntos porcentuales más que el coeficiente de variación de las densidades agrupadas por clones.

El objetivo es obtener una caracterización temprana de esta propiedad física y luego ranquear a los clones para su clasificación dentro del Programa de Mejoramiento Genético. Los resultados obtenidos para la densidad básica promedio de todos los clones estudiados se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Densidad básica de todos los clones y diferencias significativas

Observación	Clon	Densidad básica (g/cm^3)	Tuckey ($p < 0,05$)
1	B 6	0,435	A
2	SS 24	0,405	AB
3	SS 19	0,404	AB
4	B 23	0,398	AB
5	SS 17	0,377	ABC
6	SS 9	0,377	ABC
7	SM 13	0,375	ABC
8	T 65	0,374	ABC
9	TT 775	0,374	ABC
10	SS 12	0,371	ABC
11	SS 20	0,371	ABC
12	T 296	0,370	ABC
13	SS 8	0,370	ABC
14	SM 24	0,370	ABC
15	SS 10	0,369	ABC
16	SS 22	0,367	ABC

17	T 231	0,366	ABC
18	SS 13	0,359	BC
19	SM 27	0,359	BC
20	SS 6	0,356	BC
21	SS 1	0,352	BC
22	SS 16	0,345	BC
23	T 256	0,344	BC
24	B 38	0,339	BC
25	SM 1	0,337	BC
26	SM 31	0,319	C

Como se puede ver también se realizó el análisis de varianza para la densidad básica promedio de los clones. Se usa como criterio el valor 0,05 para tener un 95% de confianza en los valores obtenidos. Si los valores de α son mayores a 0,05 se opta por la hipótesis nula y no hay ninguna diferencia estadística significativa entre los promedios de los valores.

En este caso el valor de α fue menor a 0,05. La comparación de Tuckey determinó que existen diferencias significativas entre los clones, las cuales son representadas por las distintas letras.

4.2.1. Densidad básica según la edad

Aunque no existen diferencias significativas (con un 99% de confianza) entre el promedio de densidades básicas para los 3 años evaluados, no es correcto hacer un análisis por edad. Ningún clon se repite en los distintos años, los clones son distintos en las diferentes edades. Para saber si la densidad aumenta por efecto de la edad se debería tomar un clon y evaluarlo en cada una de las 3 edades.

4.2.2. Análisis de varianza de densidad según la edad

4.2.2.1. Plantaciones realizadas en el 2002

El tipo de análisis elegido para el análisis de varianza fue el test de tipo 3, de efectos fijos.

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
12	1,43	0,2144

El valor de α fue mayor a 0,05, lo que determina que no existan diferencias significativas. De todas maneras se hace el análisis de Tuckey con $p < 0,05$ (probabilidad de 95%) y $p < 0,1$. Los resultados son los siguientes.

Cuadro 6. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2002

Observación	Clon	Densidad básica	Tuckey ($p < 0,05$)	Tuckey $p < 0,1$
1	B 23	0,398	A	A
2	SS 9	0,377	A	AB
3	SS 12	0,371	A	AB
4	SS 20	0,371	A	AB
5	T 296	0,371	A	AB
6	SM 24	0,370	A	AB
7	SS 10	0,369	A	AB
8	SS 22	0,367	A	AB
9	SS 13	0,359	A	AB
10	SM 27	0,359	A	AB

11	SS 16	0,345	A	AB
12	SM 1	0,337	A	AB
13	SM 31	0,320	A	B

El análisis estadístico planteado determina que no existen diferencias significativas ($p < 0,05$) en el promedio de densidad de los clones plantados en el 2002. Sin embargo parecen destacarse el clon B 23 cuando el análisis se realiza con una $p < 0,10$.

4.2.2.2. Plantaciones realizadas en el 2003

El mismo análisis se realizó para los clones del año 2003. Los resultados de la prueba F son los siguientes:

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
4	38,57	$<0,0001$

Con un valor de α tan bajo, se opta por la hipótesis alternativa, esto significa que al menos una clon tiene promedios que son diferentes. Los resultados obtenidos para el análisis de Tuckey con $p < 0,05$ y son los siguientes:

Cuadro 7. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2003

Observación	Clon	Densidad básica (g/cm^3)	Tuckey ($p < 0,05$)
1	B 6	0,435	A
2	SS 17	0,377	B
3	SM 13	0,375	B
4	SS 8	0,370	B
5	T 231	0,366	B

Los resultados obtenidos son contundentes en la determinación de un mayor valor de densidad para el clon B 6.

4.2.2.3. Plantaciones realizadas en el 2004

Se presenta al análisis de varianza para los clones plantados en el año 2004.

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
7	7,79	0,0007

Al igual que los clones plantados en el año 2003, el valor de α es menor que 0,05 y por lo tanto se procede a realizar un análisis de Tuckey. Los resultados obtenidos con $p < 0,05$ son los siguientes:

Cuadro 8. Análisis de medias de densidad básica para plantaciones realizadas en el 2004

Observación	Clon	Densidad básica	Tuckey ($p < 0,05$)
1	SS 24	0,405	A
2	SS 19	0,404	A
3	T 65	0,374	AB
4	TT 775	0,373	AB
5	SS 6	0,356	B
6	SS 1	0,353	B
7	T 256	0,344	B
8	B 38	0,339	B

El análisis de los clones plantados en el 2004 resultan en la superioridad estadística del clon SS 24 y SS 19. El valor de los clones no solamente es superior dentro de su grupo sino que posee un valor superior a los clones plantados en el 2002.

4.3. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO INDIRECTO: PILODYN

La estimación de la densidad por un método indirecto y no destructivo es uno de los objetivos de esta tesis. De esta manera se podrá obtener una correlación entre el método directo e indirecto de esta propiedad física de la madera. La correlación será propia del material genético y las condiciones en las que fue analizado. Servirá para determinar rangos o clases de árboles con menor o mayor densidad básica.

Los valores de Pilodyn también se agrupan por clon, haciendo un promedio de 3 árboles, desestimando la variabilidad genética y atribuyendo la variabilidad ambiental como única fuente de variación. El resultado se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 9. Valores resumen de Pilodyn para todos los árboles medidos.

No. de clones	Pilodyn					CV** (%)
	Prom. (mm)	Mín. * (mm)	Lím. * inf.	Lím. * sup.	Máx. (mm)	
26	21,6	18,6	19,2	25,0	25,7	8,0

* límite inferior y superior determinado por un 95% de confianza de la media

** coeficiente de variación

Cuando se analiza el valor de Pilodyn por cada uno de los árboles (no agrupados por clones) se obtiene un coeficiente de variación de 10,7%, solamente 2,7 puntos porcentuales más que el coeficiente de variación del valor de Pilodyn agrupados por clones.

Los valores promedio corresponden al promedio de las dos mediciones realizadas al norte y sur en 3 árboles distintos (6 valores). El promedio de 6 valores determina de alguna manera la distribución normal de la variable “Pilodyn”, lo que resulta en que los límites inferior y superior del intervalo de confianza sean distintos al mínimo y máximo total.

Del cuadro anterior se desprende que los valores de penetración de Pilodyn no presentan gran variación en cuanto a su magnitud, el coeficiente de variación es pequeño.

4.3.1. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad

A continuación se presentan los valores de correlación entre la densidad básica y el Pilodyn, métodos de muestreo destructivo y no destructivo respectivamente. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson como una medida de la correlación entre

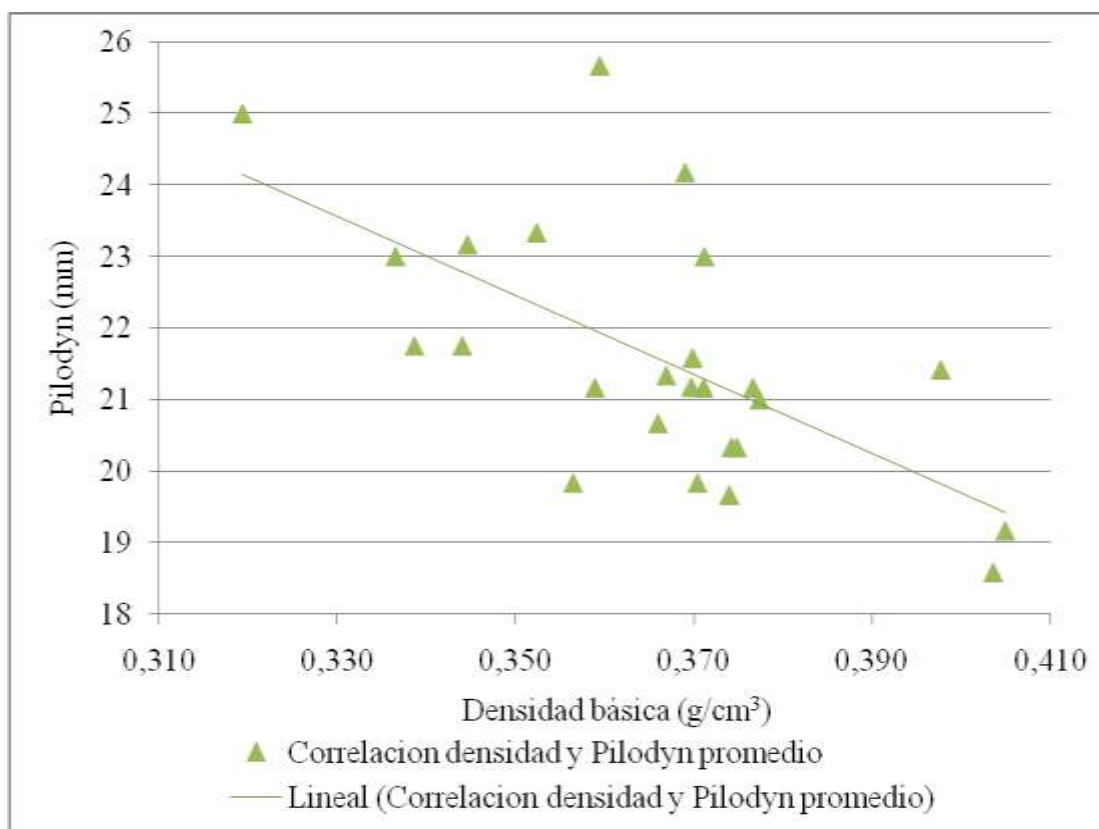
dos variables aleatorias continuas. Esta correlación no tiene en cuenta la escala de las variables.

El clon B6 no se tomó en cuenta para el análisis de correlación entre métodos directos e indirectos de la densidad de todos los clones. La decisión de exclusión se debe a su correlación alta y positiva entre las dos variables de análisis. De todos modos es uno de los clones con mayor densidad básica por lo que se lo debería continuar analizando en detalle.

Cuadro 10. Correlación de Pearson entre densidad básica y Pilodyn

Variables	N	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	25	-0,63	-0,29	-0,81

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

Gráfico 3. Correlaciones entre densidad básica y Pilodyn

Existe una correlación lineal media-alta y negativa entre ambas variables de -0,63. De haber ajustado una correlación polinómica de segundo grado la correlación es -0,66.

4.3.1.1. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según la edad

A continuación se detallan los valores de correlación entre el valor de Pilodyn y densidad básica de los clones evaluados según la edad.

Cuadro 11. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2002.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	13	-0,55	0,0	-0,85

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El test de chi-cuadrado de contingencia se usa para comprobar la independencia de dos caracteres estadísticos. En el marco gaussiano (y solamente en este marco) dos variables aleatorias son independientes si y sólo si ellas no están correlacionadas. El problema aquí es decidir si una correlación observada entre dos caracteres estadísticos, medidos en los mismos individuos, es o no significativa. El análisis estadístico de la correlación en el 2002 determina que el valor de chi-cuadrado (χ^2) sea menor a 0,05, por lo que podemos decir que las variables están correlacionadas. Sin embargo, la correlación es media ya que a partir de 0,7 se empieza a considerar como alta.

Los valores de correlación obtenidos para los clones plantados en el 2003, sin considerar el clon B6, se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2003.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	4	-0,15	0,95	-0,97

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

En este caso, el valor de correlación fue bajo, el χ^2 determinado fue de 0,85, por lo tanto no existe correlación entre las dos variables. El número de muestras también es bajo y determina que el intervalo de confianza sea de gran amplitud, alcanzando valores positivos y negativos muy altos.

Los resultados de la correlación entre la densidad básica y el Pilodyn para los clones plantados en el año 2004, se presenta en el cuadro 13.

Cuadro 13. Coeficiente de correlación entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para plantaciones realizadas en el 2004.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	8	-0,76	-0,30	-0,93

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

La correlación de ambas variables para los clones plantados en 2004 (4 años de edad) es la mayor correlación obtenida, teniendo como criterio de diferenciación la edad de los clones. Su valor de χ^2 fue menor a 0,05 por lo que se puede decir que existe una correlación positiva y alta entre ambas variables.

Además de tener una correlación positiva y alta, los clones plantados en el 2004 tiene un intervalo de confianza más reducido (0,63) que los plantados en el 2002 y siempre en un rango de valores negativos.

4.3.1.2. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según el nivel de densidad

De acuerdo a lo descrito en la revisión bibliográfica, se analiza la correlación de las dos variables agrupando a la densidad según alta o baja. Para la determinación del valor “alto” se toman los clones que tengan un valor de densidad más alto que el valor de densidad promedio del total de los clones. Todos los clones que tengan un valor de densidad por debajo el promedio total general se consideran de densidad “baja” (en Anexo 1, criterio de clasificación 1).

Siempre se excluye del análisis el clon B 6 por saber que su correlación es muy alta y positiva, totalmente lo contrario a lo esperado y distorsiona los valores de correlación total de ambas variables.

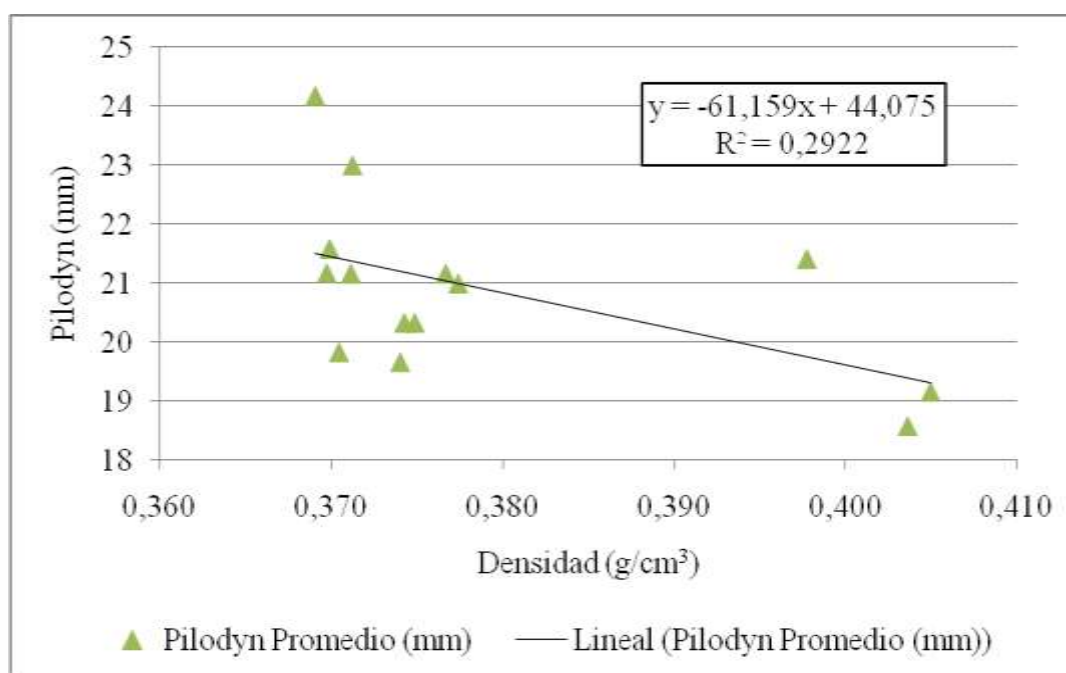
Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “alta”

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica alta	14	-0,54	-0,01	-0,83

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El valor de χ^2 resultante del análisis de esta correlación fue bajo (menor a 0,05) y determina que existe una correlación media y negativa entre las variables.

Gráfico 4. Correlación entre densidad básica y Pilodyn para densidades “altas”

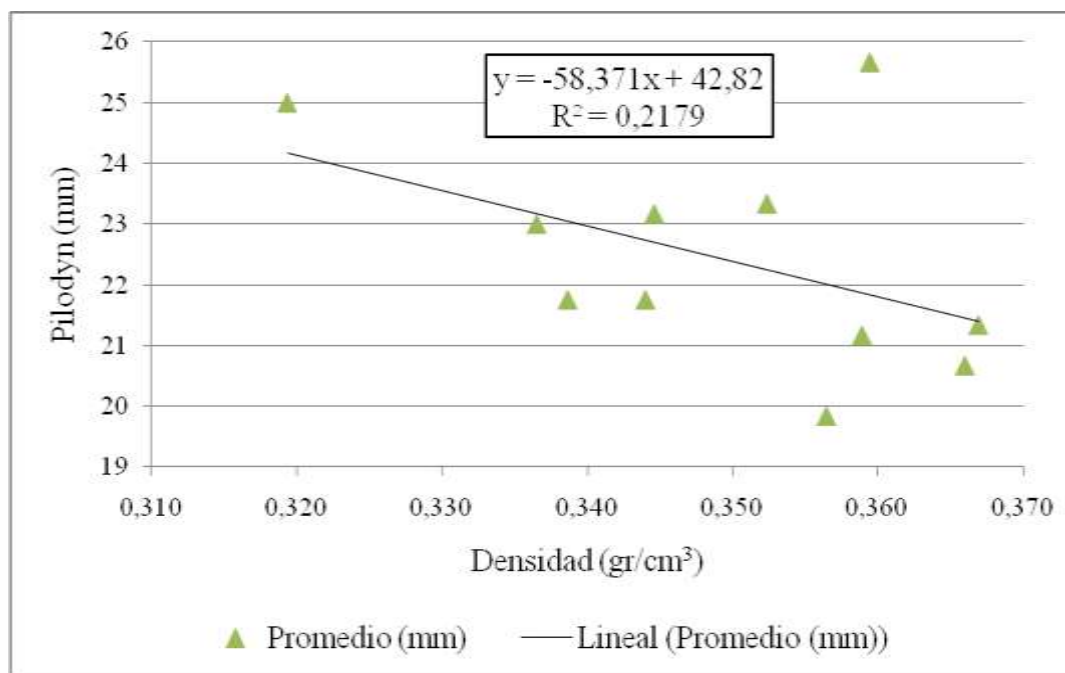


Cuadro 15. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “baja”

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	11	-0,47	0,18	-0,84

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

Gráfico 5. Correlación entre densidad básica y Pilodyn para densidades “bajas”



El valor de x^2 resultante del análisis de esta correlación fue alto (mayor a 0,05) y determina que no existe una correlación entre las variables.

Existe una correlación más elevada para la clase de densidad “alta” (-0,53) comparado con la clase de densidad “baja” (-0,47) con diferencia estadística determinada con un 95% de confianza.

Si realizó otro análisis de correlación según el ojo del investigador (Anexo1, criterio de clasificación 2), teniendo como base el análisis de medias. Se agregó un grupo de clones de densidades “medias” y se disminuyó el grupo de clones de densidades “bajas”. Los resultados se pueden ver en el siguiente cuadro.

Cuadro 16. Correlación entre densidad básica y Pilodyn según tipos de densidad (criterio de clasificación 2)

Clasificación de densidad	No.	r^*
Alta	3	- 0,91
Media	13	- 0,47
Baja	9	- 0,37

* no presenta análisis estadístico

En general se obtienen valores menores a la correlación general de los 25 clones (-0,63), aunque el valor de correlación de los clones de mayor densidad es netamente superior a este. La correlación para los clones de densidad “media” es la misma correlación que para clones con densidad “baja” según el criterio 1. Las correlaciones según el criterio 2 fueron realizados sin análisis estadístico de significancia.

4.3.1.3. Correlación entre densidad básica y Pilodyn según el valor de Pilodyn

El análisis desarrollado en el sub-capítulo anterior puede ser realizado de manera inversa, clasificando los clones según un nivel “alto” de Pilodyn y un nivel “bajo” de Pilodyn. Los valores altos son los que están por encima de la media y los “bajos” por debajo de la media. De esta manera se puede determinar un mecanismo práctico para determinar clones con densidad básica alta y baja en futuras mediciones.

Los resultados son similares, la clase “alta” de Pilodyn presenta una correlación de -0,64 y la clase de Pilodyn “baja” presenta una correlación de -0,12.

Para obtener una idea más práctica de lo que representan estas correlaciones se determinaron diferentes probabilidades que involucran los valores de Pilodyn y los de densidad.

Cuadro 17. Valores de probabilidad al utilizar el Pilodyn para encontrar un valor de densidad mayor a la media

Pilodyn	Probabilidad de encontrar una densidad mayor a la media
Clase 1. Pilodyn entre la media (21,6 mm) y el mínimo (18,58 mm)	69,8%
Clase 2. Pilodyn entre 19,83 mm y el mínimo (18,58 mm)	100%

Cuadro 18. Valores de probabilidad al utilizar el Pilodyn para encontrar un valor de densidad mayor a la media

Pilodyn	Probabilidad de encontrar una densidad menor a la media
Clase 3. Pilodyn entre la media (21,6 mm) y el máximo (25,67 mm)	77,4%
Clase 4. Pilodyn entre 24,18 mm y el máximo (25,67 mm)	100%

4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DIRECTO

A continuación se presentan los valores resumen de MOE para los 26 clones analizados. El análisis se basa en 104 medidas agrupadas en 2 árboles por cada clon y 2 probetas por árbol: norte y sur. El contenido de humedad de las probetas medidas fue de 13,8%.

Cuadro 19. Módulo de Elasticidad según orientación para todos los clones

No. de clones	MOE					CV ** (%)
	Prom. (N/mm ²)	Mín. (N/mm ²)	Lím. inf.*	Lím. sup.*	Máy. (N/mm ²)	
26	9.062	6.877	6.970	10.549	11.243	11%

* límite inferior y superior determinado por un 95% de confianza de la media

** coeficiente de variación

Cuando se analiza el valor de Módulo de Elasticidad por cada uno de los árboles (no agrupados por clones) se obtiene un coeficiente de variación de 12,4%, solamente 1,4 puntos porcentuales más que el coeficiente de variación del valor de MOE agrupados por clones.

Cuadro 20. Densidad básica de todos los clones y diferencias significativas

Clon	MOE (N/mm ²)	Tuckey (p<0,05)
SS9	11.243	A

B23	10.549	AB
B6	10.343	AB
SS12	10.335	AB
SS17	10.008	AB
SS22	9.777	AB
T296	9.719	ABC
SM13	9.646	ABCD
SM24	9.506	ABCD
SS19	9.371	ABCD
T65	9.344	ABCD
SM1	9.132	ABCD
SS16	8.929	ABCD
SS20	8.856	ABCD
SS24	8.826	ABCD
SS1	8.803	ABCD
SM27	8.664	ABCD
SS8	8.627	ABCD
TT775	8.547	ABCD
SS10	8.470	BCD
T231	8.448	BCD
SS6	8.379	BCD
SM31	8.147	BCD

SS13	8.089	BCD
T256	6.970	CD
B38	6.877	D

Como se puede ver la comparación de Tuckey determinó que existen diferencias significativas entre los clones, las cuales son representadas por las distintas letras.

El clon SS9, B23 fueron plantados en el 2002, el clon B6 en el 2003. Al igual que en la densidad, los primeros clones no corresponden a los de mayor edad. El clon de menor valor de MOE fue plantado en el 2004, es uno de los clones más jóvenes y se espera que tenga valores bajos.

Cuadro 21. Clasificación de los clones (promedio de árboles) según normas JAS

Clasificación por JAS	MOE (MPa*)	Clones
E 70	5.880 – 7.850	B38, T256
E 90	7.850 – 9.810	SS13, SM31, SS6, T231, SS10, TT775, SS8, SM27, SS1, SS24, SS20, SS 16, SM1, T65, SS19, SM24, SM13, T296, SS22
E 110	9.810 – 11.770	SS17, SS12, B6, B23, SS9

*1 MPa = 1 Newton

Según dichas normas, a partir de las categorías E 90 inclusive, la madera puede ser utilizada con fines estructurales para la construcción.

4.4.1. Análisis de varianza del Módulo de Elasticidad según la edad

4.4.1.1. Plantaciones realizadas en el 2002

El tipo de análisis elegido para el análisis de varianza fue el test de tipo 3, de efectos fijos.

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
12	4,64	0,0050

El valor de α es menor a 0,05 por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa: hay diferencias significativas entre los promedios del MOE de los clones analizados.

Los resultados obtenidos para el análisis de Tuckey con $p < 0,05$ son los siguientes.

Cuadro 22. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2002

Observación	Clon	MOE promedio (N/mm ²)	Tuckey (p < 0,05)
1	SS 9	11.243	A
2	B 23	10.549	AB
3	SS 12	10.335	AB
4	SS 22	9.777	AB
5	T 296	9.719	AB
6	SM 24	9.506	AB
7	SM 1	9.132	AB
8	SS 16	8.928	AB
9	SS 20	8.856	AB
10	SM 27	8.664	B
11	SS 10	8.470	B
12	SM 31	8.147	B
13	SS 13	8.089	B

El clon SS 9 demuestra sus valores altos de MOE para ambos análisis, mientras que los clones SM 27, SS 10, SM 31 y SS13 son los de menor valor.

4.4.1.2. Plantaciones realizadas en el 2003

El tipo de análisis elegido para el análisis de varianza fue el test de tipo 3, de efectos fijos.

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
4	1,57	0,3125

Los valores son mayores a 0,05 por lo tanto no hay diferencias significativas entre los promedios del MOE de los clones. De todas maneras se hace un análisis Tuckey con $p < 0,1$ para determinar si existe diferencia significativa con niveles de confianza menores. Los resultados obtenidos para el análisis de Tuckey con $p < 0,05$ y $p < 0,1$ son los siguientes.

Cuadro 23. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2003

Observación	Clon	MOE promedio (N/mm ²)	Tuckey (p < 0,05)	Tuckey p < 0,1
1	B 6	10.343	A	A
2	SS 17	10.008	A	A
3	SM 13	9.646	A	A
4	SS 8	8.627	A	A
5	T 231	8.448	A	A

4.4.1.3. Plantaciones realizadas en el 2004

El tipo de análisis elegido para el análisis de varianza fue el mismo que los anteriores.

Grados de libertad	Valor de F	Valor α
7	6,73	0,0077

El valor de α es menor a 0,05 por lo que existen diferencias significativas. Los resultados obtenidos para el análisis de Tuckey son los siguientes:

Cuadro 24. Análisis de medias de MOE para plantaciones realizadas en el 2004

Observación	Clon	MOE promedio (N/mm ²)	Tuckey (p < 0,05)
1	SS 19	9.371	A
2	T 65	9.344	A
3	SS 24	8.827	AB
4	SS 1	8.803	AB
5	TT 775	8.547	AB
6	SS 6	8.379	AB
7	T 256	6.970	B
8	B 38	6.877	B

4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO INDIRECTO: FAKOPP

La estimación del MOE por un método indirecto y no destructivo es uno de los objetivos de esta tesis. La mayoría de los datos disponibles en bibliografía pertenecen a valores de Fakopp en productos elaborados de la madera y su correlación con el método directo de medición de densidad.

Los valores que se presentan a continuación pertenecen al instrumento Fakopp –que mide la velocidad de propagación de una onda acústica- en madera de árboles en pie, llevados a valores de fuerza por unidad de superficie de acuerdo a la ecuación presentada en el sub-capítulo 2.6.

Cuadro 25. Valores resumen de Fakopp para todos los árboles medidos.

No. de clones	Fakopp					CV** (%)
	Prom. (N/mm ²)	Mín. (N/mm ²)	Lím. * inf.	Lím. * sup.	Máx. (N/mm ²)	
26	8.498	7.080 (B 38)	7.182	9.885	9.896 (B 23)	8,6

Los valores promedio general son el promedio de 3 árboles por clon y 2 mediciones según el grado de orientación: 6 medidas. Esto hace que la distribución sea más dispersa, los valores del límite y superior no son iguales a los máximos y mínimos totales.

Los valores de coeficiente de variación indican que el desvío estándar para la medición del MOE con Fakopp es un valor bajo.

4.5.1. Fakopp según la edad

Los valores de Fakopp pueden ser discriminados según la edad de los clones y de este modo se puede llegar a remarcar la diferencia entre el MOE -medido indirectamente- y el año de plantación.

Cuadro 26. Valores resumen de Fakopp según la edad de los clones medidos.

Año de plantación	Parámetro	No.	Promedio
2002 (6 años)	Fakopp (N/mm ²)	13	8.953
	CV (%)	13	6,7
2003 (5 años)	Fakopp (N/mm ²)	5	8.177
	CV (%)	5	9,8
2004 (4 años)	Fakopp (N/mm ²)	8	7.959
	CV (%)	8	7,1

Existen diferencias estadísticas que determinan que los clones plantados en el 2002 (A) tengan un mayor valor de Fakopp que los clones plantados en el 2004 (B). Los clones plantados en 2003 comparte las características de los dos (AB).

4.5.2. Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad

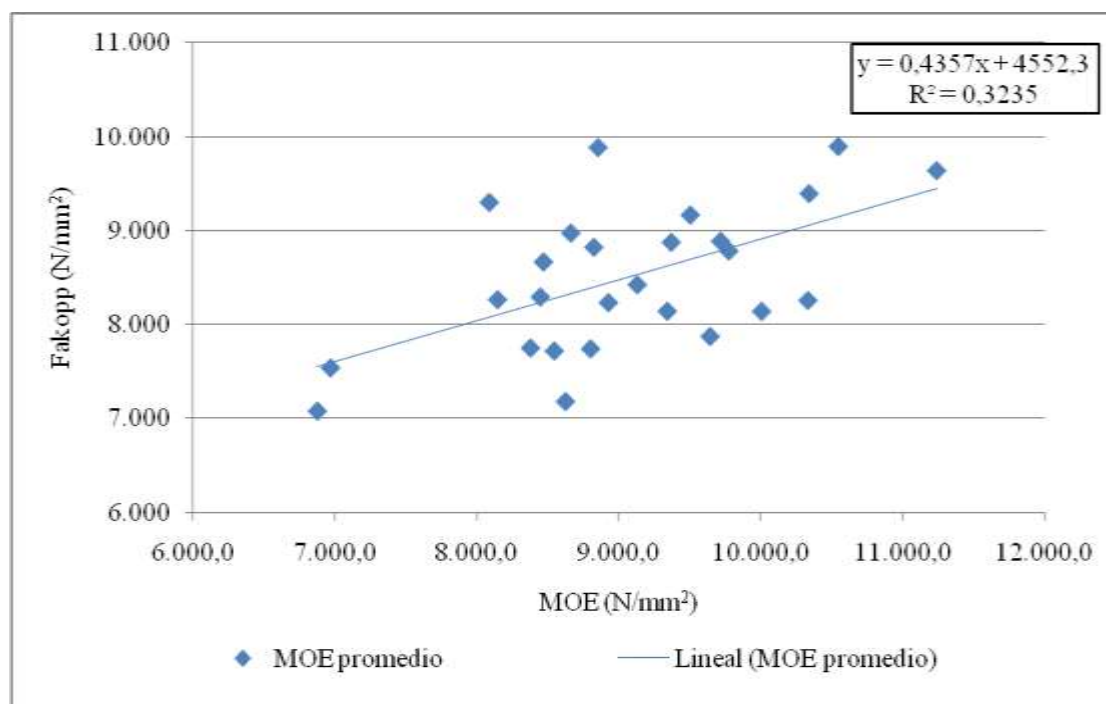
La correlación entre la medición del MOE mediante máquina universal y Fakopp se presenta en el siguiente cuadro. Se utilizó la correlación de Pearson como medida de la correlación.

Cuadro 27. Correlación de Pearson entre método directo e indirecto de medición del MOE

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
MOE y Fakopp promedio	26	0,57	0,23	0,78

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El valor de x^2 determina que existe una correlación entre ambas variables, es media y positiva. La representación gráfica de la correlación se presenta a continuación.

Gráfico 6. Correlación entre medición directa e indirecta del MOE

La correlación se ajusta a una correlación del tipo lineal. El valor de r (0,57) se obtiene del resultado de la raíz cuadrada de R^2 (0,32).

4.5.2.1. Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad según la edad

A continuación se presenta el valor obtenido de la correlación entre el MOE medido en forma directa e indirecta para el año 2002 (6 años).

Cuadro 28. Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2002.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
MOE y Fakopp promedio	13	0,32	-0,28	0,74

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El valor de χ^2 es mayor a 0,05, por lo que se puede decir que no existe correlación entre ambas variables. Incluso el límite inferior del intervalo de confianza

(con un 95% de confianza) es un valor negativo, o sea que el cero está incluido en la correlación.

Para los clones plantados en 2003 (5 años), los valores de correlación entre el MOE y Fakopp son los que se presentan en el cuadro 29.

Cuadro 29 Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2003.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
MOE y Fakopp promedio	5	0,69	-0,49	0,98

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El valor de x^2 es 0,2 (mayor a 0,05) por lo que se puede decir que no existe correlación entre ambas variables, aunque el valor de correlación haya sido 0,69. Nuevamente el límite inferior del intervalo de confianza (con un 95% de confianza) es un valor negativo y alto, lo que hace incluir el valor cero dentro del rango de posibles valores de correlación.

Para los clones plantados en 2004(4 años), se presentan los valores de correlación entre MOE y Fakopp en el cuadro 30.

Cuadro 30 Coeficiente de correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp para plantaciones realizadas en el 2004.

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
MOE y Fakopp promedio	8	0,78	0,16	0,96

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

El valor de x^2 es 0,02 (menor a 0,05) por lo que la correlación entre ambas variables es alta y positiva.

Los valores de correlación son en general más altos cuando se desglosa el análisis por año de plantación. Los clones plantados en el 2003 y 2004 tienen valores de correlación más altos que la correlación general de los 26 clones entre el MOE y el Fakopp. No sucede del mismo modo con los clones plantados en el 2002.

Sin embargo existe un menor rango de valores para el mismo nivel de confianza en la correlación de ambas variables medido en todos los clones. Tanto el límite inferior

como el límite superior del intervalo de confianza de la correlación entre MOE y Fakopp son valores positivos y cercanos a la media.

4.5.2.2. Correlación entre medición directa e indirecta del Módulo de Elasticidad según el nivel de MOE

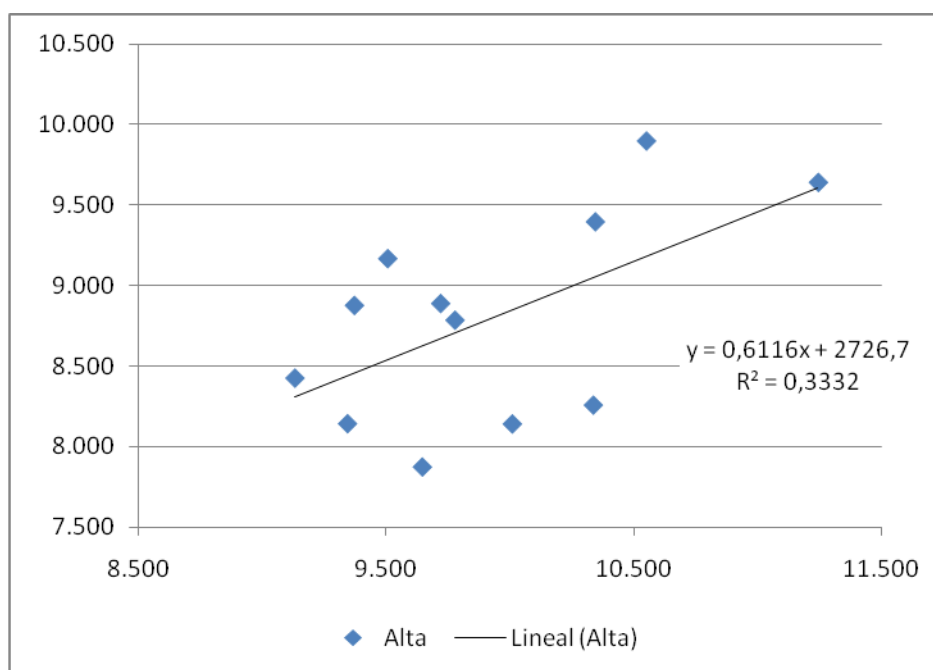
Se analiza la correlación de las dos variables agrupando al Módulo de Elasticidad según un valor alto o bajo. Para la determinación del valor “alto” se toman los clones que tengan un valor de densidad más alto que el valor de densidad promedio del total de los clones. Todos los clones que tengan un valor de densidad por debajo el promedio total general se consideran de densidad “baja”.

Cuadro 31. Coeficiente de correlación de Pearson entre la Módulo de Elasticidad (N/mm^2) y Fakopp (N/mm^2) para el grado de densidad “alta”

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	11	0,71	0,19	0,92

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

Gráfico 7. Correlación entre Módulo de Elasticidad “alta” y Fakopp



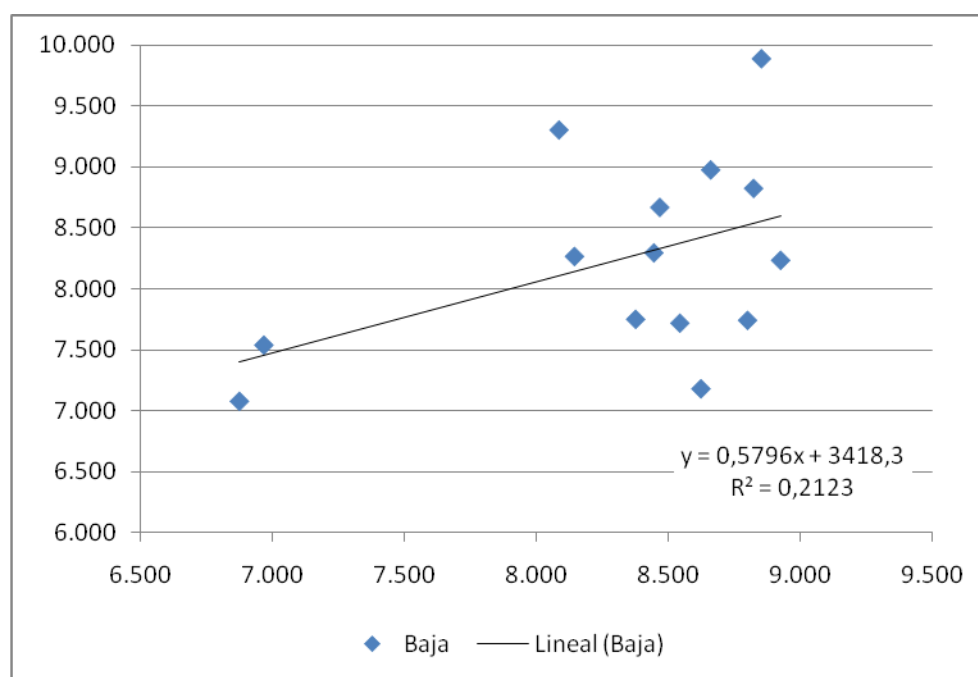
El valor de x^2 resultante del análisis de esta correlación fue muy bajo (0,01) y determina que existe una correlación alta y positiva entre ambas variables.

Cuadro 32. Coeficiente de correlación de Pearson entre la densidad básica (g/cm^3) y Pilodyn (mm) para el grado de densidad “baja”

Variables	No.	r (correlación de Pearson)	Intervalo de confianza*	
			Límite inferior	Límite superior
Pilodyn promedio y densidad básica	15	0,35	-0,20	0,73

*Intervalo de 95% de confianza para la media.

Gráfico 8. Correlación entre MOE “baja” y Fakopp



El valor de x^2 resultante del análisis de esta correlación fue alto (mayor a 0,05) y determina que no existe una correlación entre las variables.

4.5.2.3. Correlación entre MOE y Fakopp según el valor de Fakopp

El análisis desarrollado en el sub-capítulo anterior puede ser realizado de manera inversa, clasificando los clones según un nivel “alto” de Fakopp y un nivel “bajo” de Fakopp. Los valores altos son los que están por encima de la media y los

“bajos” por debajo de la media. De esta manera se puede determinar un mecanismo práctico para determinar clones de MOE alta o baja en futuras mediciones.

Los resultados son similares, la clase “alta” de Fakopp presenta una correlación de 0,60 (correlación media) y la clase de Fakopp “baja” presenta una correlación de 0,43 (correlación baja). Estos valores no tienen análisis estadístico.

Para obtener una idea más práctica de lo que representan estas correlaciones se determinaron diferentes probabilidades que involucran los valores de Pilodyn y los de densidad.

Cuadro 33. Valores de probabilidad al utilizar el Fakopp para encontrar un valor de MOE menor a la media

Fakopp	Probabilidad de encontrar una MOE menor a la media
Clase 1. Fakopp entre la media (8.498 N/mm ²) y el mínimo 7.080 (N/mm ²)	64%
Clase 2. Pilodyn entre 7.874 (N/mm ²) y el mínimo (7.080 N/mm ²)	100%

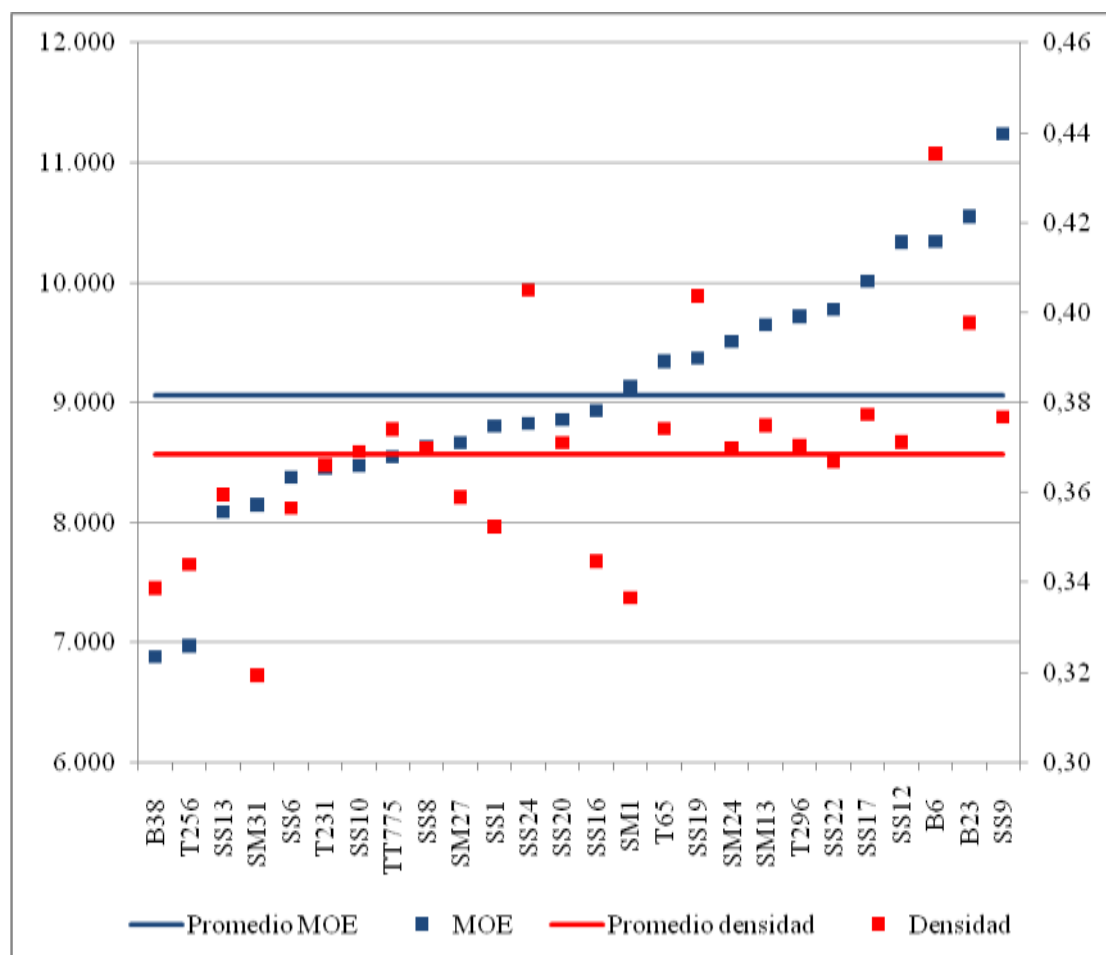
Cuadro 34. Valores de probabilidad al utilizar el Fakopp para encontrar un valor de MOE mayor a la media

Fakopp	Probabilidad de encontrar una densidad mayor a la media
Clase 3. Pilodyn entre la media (8.498 N/mm ²) y el máximo 9.896 (N/mm ²)	58%
Clase 4. Pilodyn entre 9.885 (N/mm ²) y el máximo (9.896)	100%

4.6. RANKING DE CLONES

Como las variables densidad básica y módulo de elasticidad evaluadas en este trabajo tienen correlaciones positivas, se pueden seleccionar clones por cualquiera de las dos características sabiendo que se va estar ganando en ambas.

Gráfico 9 Análisis de la densidad y MOE para todos los clones



De acuerdo al gráfico 6 se pueden hacer 3 grandes categorías de clones. Los clones “buenos” son los que tienen un valor de densidad y MOE por encima de su respectiva media, clones “medios” son los que tienen un valor de densidad por encima de su media pero el valor de MOE se encuentra por debajo de su media y clones “malos” son los que no tienen ni la densidad ni el MOE por encima de la media.

Los resultados que toman como favorable el aumento de la densidad como criterio de clasificación, son presentados en el cuadro siguiente.

Cuadro 35. Ranking de clones según el valor de densidad básica y MOE

Categoría	Clones
Buenos	T 65, SS 19, SM 24, SM 13, T 296, SS 17, SS, 12, B6, B 23, SS 9
Medios	SS 10, TT 775, SS 8, SS 24, SS 20, SM 1, SS 22
Malos	B 38, T 256, SS 13, SM 31, SS 6, T 231, SM 27, SS 1, SS 16

Los clones B 38 y T 256, que fueron clasificados en la norma JAS como madera que no se puede utilizar para la construcción, se encuentran entre los clones “malos”.

5. DISCUSIÓN

5.1. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO DIRECTO

La discusión y análisis que se detalla en este capítulo se refiere a la estimación de densidad y su correlación con el valor de Pilodyn teniendo en cuenta los promedios de cada uno de los clones. El análisis de variabilidad intra-clonal concuerda con los valores bajos obtenidos por Lima et al. (2001), típico del material clonal. La variabilidad ambiental fue desestimada e incluida en la variabilidad inter-clones.

Sin embargo, Fernández (2004) determinó que la densidad básica media de un ensayo de clones de *Eucalyptus grandis* plantados en la misma zona de estudio de este trabajo es de $0,368 \text{ g/cm}^3$, medido por probetas de incremento radial o tarugo. Este valor es de similar magnitud que la determinada por este trabajo: $0,369 \text{ g/cm}^3$, aunque el método utilizado en este trabajo fue distinto y la edad de los clones de Fernández (2004) es de 2 y 3 años.

El valor de densidad básica en el presente trabajo parece no depender del año de plantación o la edad de los clones. No existen diferencias significativas entre la media de densidad según la edad. Lima et al. (2001), Achugar y Scaglione (2003) encontraron que existe una tendencia de la densidad a aumentar con la edad de los clones.

La no concordancia con las conclusiones de Lima et al. (2001), Achugar y Scaglione (2003) se basa en que la clasificación según la edad de los clones en este trabajo, determina que no se repita ningún clon en más de un año. Son clones distintos y no se puede analizar el incremento de la densidad según el incremento de la edad porque no se analizó ningún clon en más de una edad.

Con respecto al incremento de densidad según la edad de los clones, se recomienda medir *a posteriori*, uno o varios clones de cada uno de los años de plantación para su análisis.

5.2. DENSIDAD BÁSICA POR MÉTODO INDIRECTO Y NO DESTRUCTIVO

No se midió el error analítico del Pilodyn aunque se piensa que debe existir. La diferencia de valores entre las mediciones norte y sur podría determinar el error del instrumento si asumimos que la “penetrabilidad” del émbolo (o la densidad de la madera) va a ser la misma en cualquier punto al DAP del fuste. No se encontró ninguna fuente que determinara a esta asunción como válida, por lo tanto las mediciones en los distintos puntos cardinales sirvió para promediar la “penetración típica” de la madera de un árbol en pie al DAP.

De todos modos la diferencia entre la medición del Pilodyn al norte o sur fue de décimas de milímetros, los máximos y mínimos valores fueron similares y el coeficiente de variación para las mediciones de Pilodyn al norte y sur fue baja, 8,0% y 8,4% respectivamente. Por lo que se concuerda con Greaves et al. (1995), Hansen (2000), quienes recomiendan por lo menos 2 medidas por árbol con Pilodyn para obtener resultados confiables.

5.3. CORRELACIÓN ENTRE MEDICIÓN DIRECTA E INDIRECTA DE LA DENSIDAD

Los resultados obtenidos en el cuadro 11 ($r = -0,63$) parecen no demostrar una correlación alta y negativa entre la densidad básica del árbol (medida en un disco obtenido a la altura del pecho) y la penetración del émbolo del Pilodyn. Valores superiores fueron obtenidos por Pérez (2001) quien determinó que la correlación entre ambas variables es de $-0,836$.

El valor también está por debajo del valor encontrado por Böthig (2001) de $-0,84$. La diferencia entre valores puede estar determinada porque Böthig (2001) determinó una correlación potencial, mientras que el valor hallado en el presente trabajo es de una correlación lineal. Sin embargo una correlación polinómica de segundo grado (la que resulta tener la correlación más alta) tiene un valor de $-0,664$.

Algunos autores consideran la correlación de estas dos variables según la densidad periférica o medular del árbol. El criterio de clasificación se basa en la presencia y distribución de madera juvenil y madura adulta en el tronco del árbol. El presente trabajo no toma en cuenta este criterio debido a la poca edad de los clones. Esta es la razón por la cual, en general, se obtienen resultados menores a los encontrados en bibliografía. Entre ellos De Mello et al. (2002), Doldan (2003) quienes determinaron que la correlación entre Pilodyn y densidad básica tiene valores más altos cuando se usa un valor de densidad obtenido en un punto cercano a la corteza, $-0,837$ y $-0,84$ respectivamente.

Doldan (2003) determinó también una correlación de $-0,79$ entre Pilodyn y densidad básica, valor que está por encima del determinado en este trabajo.

Fernández (2004) obtuvo una correlación de $-0,800$ entre Pilodyn y densidad media en un ensayo de clones de *Eucalyptus grandis* de 5 años de edad en el departamento de Rivera.

Sin embargo, la correlación concuerda con los valores encontrados por Böthig (2001) quien discriminó la correlación potencial en dos correlaciones lineales según grupos de densidades. Los valores de correlación para clones de baja densidad determinaron un $r = -0,69$ y para clones de alta densidad un $r = -0,67$.

Según esta misma autora, la discriminación de grupos según densidades altas o bajas, provocaría un mayor valor de correlación cuando se trabaja con clones de menor densidad debido al aumento de la sensibilidad del instrumento. En este trabajo la diferenciación entre densidades altas o bajas determinó diferencias entre los dos grupos, pero los clones de mayor densidad fueron los que obtuvieron mayores valores de correlación y los clones de menor densidad obtuvieron los menores valores de correlación. Sucedió lo mismo al realizar 3 grupos de densidades: altas, medias y bajas.

Las correlaciones encontradas por Achugar y Scaglione (2003) también coinciden con los valores de este trabajo. La medición de un clon en varias edades distintas (desde 2,2 a 6,7 años) resultó en un valor de correlación entre el promedio de densidad (zona central y zona periférica) y el Pilodyn de -0,678, valor muy cercano al -0.626 del presente trabajo.

Finocchietti (2005) también determinó un valor de correlación entre Pilodyn y densidad básica para *Eucalyptus grandis* medido a los 8 años de edad de -0,66, valor cercano al del presente trabajo.

También se coincide con López et al. (2002) ya que se puede tener una clasificación con Pilodyn para determinar “familias” y con Fernández (2004) en la medida de que los clones con mayores valores promedio de densidad básica son los que tienen valores más altos de correlación entre ambas variables.

5.3.1. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según la edad

Según el trabajo de Achugar y Scaglione (2003) la correlación de densidad y Pilodyn de clones evaluados a los 2,2, 3,2, 4,7, 5,7 y 6,7 no presentan diferencias significativas entre ellas. La correlación de un clon a la edad de 2,2 años puede ser comparada con correlaciones en clones de 6,7 años.

La distinción de correlaciones según las 3 edades de los clones estudiadas en este trabajo no determinó valores superiores a los encontrados cuando se utilizan todos los clones (a excepción de los clones plantados en el 2004). En general se obtienen valores menores y con una amplitud de límites (para un 95% de confianza) mayor.

No se realizó un análisis entre correlaciones sino que se realizó la prueba de chi cuadrado para determinar si cada valor de correlación obtenido implica una correlación entre la densidad básica y el Pilodyn. En el caso de los clones plantados en el 2002 y 2004 si existe una correlación, aunque los valores son medios en el 2002 y altos en el 2004. Los clones plantados en 2003 no presentan correlación.

Se puede decir que si existen diferencias significativas entre las distintas correlaciones agrupadas por los distintos años ya que los clones en el 2003 no presentan correlación alguna.

La eficacia de la prueba chi-cuadrado no se ha determinado con exactitud; sin embargo, a medida que el tamaño de la muestra aumenta, el valor de probabilidad de error para aceptar hipótesis alternas se acerca a 1. En sentido opuesto, cuando el número de la muestra es menor que 20, se pierde eficacia. No es conveniente aplicar la prueba de chi-cuadrado en estas condiciones. De todas maneras, no se encontraron otras alternativas.

5.3.2. Correlación entre medición directa e indirecta de la densidad según el nivel de densidad

Los valores obtenidos por correlación de Pearson entre Pilodyn y valores “altos” o “bajos” de densidad son inferiores a los valores obtenidos por la correlación de Pearson de los 25 clones sin agrupación.

Sin embargo, este análisis de correlación determina que los clones con densidad “alta” (densidad superior a la media), tienen un valor de correlación alto con el valor de Pilodyn. Por el contrario, los clones de densidad “baja” no presentan correlación con los valores de Pilodyn. El valor obtenido de esa correlación (-0,47) junto a la prueba de chi-cuadrado determina que ambas variables son independientes. Estos resultados se ven mayormente reflejados cuando la clasificación de densidad se realizan en tres grupos: “alta”, “media” y “baja”.

Esto quiere decir que cuando se trabaje con clones de alta densidad es muy factible que los valores de Pilodyn sean bajos.

El objetivo de la tesis consistió en determinar la correlación entre un método directo y otro indirecto para medir la densidad. Este es un resultado que se espera para poder determinar una manera rápida y confiable de seleccionar. Las clasificaciones analizadas hasta el momento toman como base de análisis la densidad básica.

Cuando se toma como base los valores de Pilodyn, se clasifica a los clones por su valor “alto” o “bajo” de Pilodyn y se lo correlaciona con el valor real de densidad. Las correlaciones son similares. Pero se puede interpretar de distinta manera (cuadro 31 y 32). Cuando elijo un clon por su valor de Pilodyn menor a la media, tengo una probabilidad de 70% de estar eligiendo un clon de densidad básica alta (mayor a la media). Cuando elijo un clon por su valor de Pilodyn mayor a la media, tengo una probabilidad de 77% de estar eligiendo un clon de densidad básica baja o menor a la media. Todos estos valores se aplican a este trabajo.

5.3.3. Correlación entre densidad básica y Pilodyn según el valor de Pilodyn

El análisis de los resultados obtenidos nos muestran que existe un 100% de probabilidad de encontrar un clon con densidad básica (según laboratorio) por encima del promedio cuando el valor de Pilodyn está por debajo del promedio. Sucede lo mismo a modo inverso, o sea, existe un 100% de probabilidad de encontrar un clon por debajo del promedio (según mediciones de laboratorio) cuando el valor de Pilodyn está por encima del promedio de valores de Pilodyn.

5.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO DIRECTO

El valor de MOE estimado en este trabajo fue de 9.062 (N/mm²) para el promedio de todos los clones. Éste está por debajo del valor obtenido por Pérez (2001) quien determinó que el valor de MOE fue de 11.300 N/mm². Sin embargo, este valor más alto fue obtenido de árboles de 16 años y medio de edad y esta propiedad está directamente relacionada con la edad de los árboles. El coeficiente de variación determinado por este trabajo fue menor que el determinado por Pérez (2001).

También estuvo por debajo de Pérez et al. (2003) quienes determinaron un valor promedio de 11.338 (N/mm²). Aunque el método utilizado por Pérez et al. (2003) fue el mismo que el usado en este trabajo y ambos sobre pequeñas probetas libres de defectos, la diferencia está determinada por las distintas edades en las que el MOE fue medido. Los valores más altos de MOE fueron determinados para árboles de *Eucalyptus grandis* de 16 años de edad. Sin embargo, el coeficiente de variación para el MOE por método directo es de similar magnitud a los concluidos por Pérez et al. (2003).

También estuvo por debajo del valor obtenidos por O'Neill et al. (2004), aunque fue medido a una edad más cercana a los clones de este trabajo. Sin embargo el valor de MOE fue similar al obtenido por Lima et al. (2000).

5.4.1. MOE por edad

El análisis de varianza del promedio de MOE agrupada por edad determina que los clones plantados entre los años 2002 y 2003 no tienen diferencias significativas, por lo tanto no se pudo comprobar la cita de Fernández (2004) ni la de Serrentino (2006) quienes afirman que las propiedades mecánicas aumentan con la edad.

La no concordancia se puede deber a que no se analizó un clon en más de una edad, son todos los clones distintos y no se repiten en más de una edad. La explicación a dicho fenómenos se puede deber a que tampoco existen diferencias significativas entre la densidad básica de los clones según la edad, por eso los valores de MOE tampoco son

significativos (correlación alta y positiva entre MOE y densidad según Serrentino, 2006).

Sin vemos en detalle, el análisis de medias de los clones plantados en el año 2002 nos muestra el valor superior del clon SS 9. Cabe mencionar que también se destaca por su densidad, ubicándose en el tercer clon con mayor densidad plantado en el 2002.

El mismo análisis realizado en el MOE para plantaciones realizadas en el 2004 determina que hay dos clones de menor MOE diferenciados estadísticamente, T256 y B38. Sin embargo, no existen diferencias estadísticas en el MOE de los clones plantados en el 2003.

5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD POR MÉTODO INDIRECTO: FAKOPP

Los valores obtenidos en este trabajo están por debajo de los valores obtenidos por Fernández (2004) quien determinó que el MOE medido con Fakopp en clones de *Eucalyptus grandis* a los 2,5 años de edad es 10.022 N/mm². El valor de MOE para los clones de 4 años de edad en este trabajo fue de 7.959 N/mm². En términos generales, el promedio de los 3 años analizados, fue de 8.500 N/mm².

No es posible comparar el MOE entre años distintos porque ningún clon se repite en más de una edad. De todos modos, a diferencia de la densidad, el MOE parece mostrar una tendencia al incremento según la edad de los clones. A mayor edad, mayor es el Módulo de Elasticidad.

Esto es parcialmente comprobado por el análisis estadístico del promedio de MOE según la edad. Los clones plantados en el 2002 son superiores (letra A) a los clones plantados en 2003 y 2004 (letra B) con un 95% de confianza.

5.5.1. Correlación entre medición directa e indirecta del MOE

Los valores obtenidos para la correlación entre el método directo de medición de MOE (Máquina Universal mediante flexión dinámica) y el indirecto (Fakopp) determinaron valores según lo esperado en bibliografía.

La correlación encontrada en este trabajo, sin embargo, estuvo por debajo de los valores encontrados por Pérez (2001) cuando determinó que el coeficiente de correlación entre MOE medido en Máquina Universal y otro método indirecto en tablas de *Eucalyptus grandis* de 16 años y medio de edad fue de 0,692. Se supone que las correlaciones son independientes de la edad de los clones. Cuando analizamos los valores encontrados por el mismo autor en el mismo informe, podemos ver que el valor

hallado está muy por debajo del dato de bibliografía. La correlación es de 0,975 aunque el MOE fue medido sobre tablas de grandes dimensiones y no probetas libres de defectos y a un contenido de humedad de 26% y no 12%.

García et al. (2006) determinaron que las correlaciones encontradas para *Eucalyptus grandis* de 16 años de edad son positivas y de alta valor: 0,69, con un límite inferior de 0,61 y un límite superior de 0,75. La correlación determinada en el presente trabajo es de 0,57, con un mínimo de 0,23 y máximo de 0,78. Por lo que existe un rango de valores compartidos entre ambas correlaciones. La diferencia puede estar determinada por el tipo de ensayo utilizado para determinar el MOE de manera indirecta (FFT Analyzer).

El valor de correlación obtenido en este trabajo fue superior al obtenido por Serrentino et al. (2006).

5.5.2. Coeficiente de correlación entre medición directa e indirecta del MOE según la edad

No existe bibliografía para comparar los valores obtenidos. Sin embargo, se añadió este capítulo por la necesidad de discutir y encontrar un mecanismo fácil y confiable para determinar el valor del Módulo de Elasticidad de los 26 clones evaluados.

Existe un año que es superior a los demás en cuanto al valor de correlación. De hecho, la prueba de chi-cuadrado determina que es el único año que presenta una correlación entre el Módulo de Elasticidad y Fakopp. El año de plantación 2004 determina que los clones evaluados tengan 4 años de edad y ese momento es el mejor momento para medir el valor de MOE indirectamente.

5.5.3. Correlación entre medición directa e indirecta del MOE según el nivel de MOE

Tampoco existe bibliografía para comparar los valores obtenidos. Sin embargo, si lo comparamos con la correlación “por tipos” obtenida en el análisis de densidad podemos ver que los valores obtenidos en el análisis de MOE son más contundentes.

Cuando se toman los clones con mayor MOE (superior a la media), el coeficiente de correlación es alto y positivo (0,71), cuando se toman valores “bajos” de MOE, no existe correlación.

Valores similares se obtienen cuando se clasifica a los clones por su valor de Fakopp “alto” (superior a la media) y “bajo” (inferior a la media). La correlación es 0,6 y 0,43 respectivamente.

5.5.4. Correlación entre MOE y Fakopp según el valor de Fakopp

El análisis de probabilidad realizado en este sub-capítulo sirve para determinar un método práctico y sencillo de evaluación de clones basado en los valores obtenidos a campo con el instrumento Fakopp.

Cuando se realiza una medición con Fakopp y se obtiene un valor por debajo de la media (de valores de Fakopp), hay una probabilidad de 64% de encontrarse frente un clon de bajo MOE.

Por el contrario, cuando se realiza una medición con Fakopp y se obtiene un valor por encima de la media (de valores de Fakopp), existe una probabilidad de 58% de encontrarse frente a un clon de MOE por encima de la media.

Los valores son medio-bajo, este análisis no serviría para realizar una clasificación de clones según MOE por el Fakopp.

6. CONCLUSIONES

El hecho de que se observaran variaciones importantes entre árboles, demuestra que es posible continuar aumentando la calidad de la madera de los *Eucalyptus grandis* mediante el mejoramiento genético seleccionando por propiedades físicas o mecánicas.

La correlación entre la densidad básica (medida en discos obtenidos al DAP) y el valor de Pilodyn resultó ser negativa y media -0,63. No es un valor confiable como para poder determinar valores de densidad básica a partir del valor de Pilodyn.

Las distintas correlaciones de la variable Pilodyn y densidad básica diferenciadas según el año de plantación de los clones, determinan que no existen correlaciones en los clones plantados en el año 2003 (5 años de edad). Sin embargo, si existe correlación entre las dos variables en clones plantados en el 2002 (6 años) y en los clones plantados en el 2004 (4 años). Esta última es muy alta (0,76) y debería utilizarse para el estudio de densidades a partir de Pilodyn.

Por lo tanto, la diferenciación de clones por edad es necesaria para evaluar la densidad básica de los clones (entre los 4 y 6 años). Se puede realizar mediciones tempranas de la densidad básica mediante el Pilodyn tanto en clones de 4 años como de 6 años.

También se determinó dos valores de correlación según la densidad básica de los clones. Se determinaron dos grupos: clones con alta densidad y clones con baja densidad y se determinaron dos correlaciones con diferencias estadísticas significativas. Ambas correlaciones están por debajo del valor de correlación promedio general, -0,53 en clones de alta densidad y -0,47 en clones de baja densidad. Por lo que no se recomienda analizar la característica densidad básica por los valores “altos” o “bajos de Pilodyn.

Se puede hacer una clasificación temprana de los clones según el Pilodyn determinando “familias” o “grupos de densidad alta o baja” según el valor de Pilodyn sea bajo o alto respectivamente. Para este trabajo, cuando se tiene un valor de Pilodyn menor a la media existe un 70% de probabilidad de estar frente a un clon con densidad básica mayor a la media. Cuando se tiene un valor de Pilodyn superior a la media, existe un 77% de probabilidad de estar frente a un clon de densidad básica menor a la media. Existen otros dos grupos. Cuando se mide con Pilodyn y se obtiene un valor de penetración entre 19,83 mm y el mínimo (18,58 mm) hay un 100% de probabilidad de estar frente a un clon de densidad por encima de la media. Por el contrario, cuando se obtiene un valor de penetración con Pilodyn mayor a 24,18mm y hasta el máximo (25,67 mm) hay un 100% de probabilidad de estar frente a un clon de densidad básica menor a la media.

La propiedad Módulo de Elasticidad no presentó diferencias significativas cuando se agrupa a los clones por edad, por lo tanto la medición de esta propiedad es indiferente a los valores de edad entre 4 y 6 años. La medición indirecta de esta propiedad si determinó diferencias significativas, que es lo que se espera según bibliografía. A mayor edad, mayor MOE.

Hay que destacar que la mayoría de los clones tienen un valor de Módulo de Elasticidad alto y podrían utilizarse con fines estructurales para la construcción, según normas JAS (Japan Agricultural Standard). Solamente los clones B38 y T256 no pertenecen a estos grupos.

La correlación entre MOE directo e indirecto para todos los clones es de un valor positivo y medio (0,57). Cuando se desglosan las correlaciones entre MOE y Fakopp por edad, obtenemos valores de menor magnitud para los clones plantados en 2002. Los clones plantados en 2003 tienen un valor de correlación mayor pero la prueba de chi-cuadrado determina que no existe correlación entre variables. Sin embargo, los clones plantados en 2004 (4 años de edad) tienen un valor de correlación muy alto (0,78) y debería utilizarse para el estudio de MOE a partir de Fakopp.

Como sucede con la densidad, la correlación de MOE directo e indirecto por niveles de MOE “alto” y “bajo” si determina una clara identificación de grupos. Se obtienen correlaciones de 0,71 cuando los valores de MOE están por encima de la media y 0,35 cuando están por debajo de la media. El instrumento Fakopp sirve para determinar el valor indirecto de MOE cuando el valor de MOE es alto (mayor a la media) pero no sirve para determinar el valor indirecto de MOE cuando el valor de MOE es bajo (menor a la media).

De manera práctica se puede agrupar los clones por un valor “alto” (por encima de la media) o “bajo” (por debajo de la media) de Fakopp y luego utilizar los valores de probabilidad para determinar su correspondencia con valores de MOE “alto” o “bajo”. No es recomendable por los bajos valores obtenidos.

García et al. (2006) dicen que se puede elegir los árboles de mayor crecimiento sin ir en contra de las propiedades densidad básica y MOE, así que el ranking realizado permitiría utilizarse para seleccionar los mejores clones al mismo tiempo que se selecciona por la variable rendimiento.

7. RESUMEN

El mejoramiento genético en una empresa forestal es una actividad que se necesita realizar constantemente para obtener clones con altos rendimientos volumétricos, buena densidad y alto módulo de elasticidad. Sin embargo, la evaluación temprana de estas propiedades, sabiendo su relación con las propiedades en esta adulto, determina una ganancia en el tiempo para seleccionar los mejores clones. En el presente trabajo se evaluó las propiedad física densidad básica y la propiedad mecánica módulo de elasticidad de la madera de 26 clones de *Eucalyptus grandis* de la zona norte del Uruguay (Rivera). Ambas características se determinaron mediante métodos directos: norma UNIT 237:2008 para el caso de densidad básica y norma UNIT 1137:2007 para el MOE. El material son 26 clones previamente elegidos por su rendimiento volumétrico en suelos de prioridad forestal de Rivera. La edad de los clones medidos fue de 4, 5 y 6 años. Se apearon 3 árboles de cada clon y se extrajeron de cada árbol un disco de más o menos 5 cm al DAP y una troza de más o menos 80cm de largo para trasladar al laboratorio y medir densidad básica y MOE respectivamente. Se determinaron ambas propiedades según métodos directos e indirectos y se analizó su correlación. Para el caso de la densidad básica se utilizó el Pilodyn, mientras que para el MOE se utilizó el Fakopp. Por último se realizó un ranking considerando ambas variables. Se determinaron los mejores clones según ambas propiedades.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*; Clones; Propiedades de la madera; Densidad básica; Pilodyn; Módulo de elasticidad; Fakopp.

8. SUMMARY

Improving genetics in a forestry company is a constant activity that must be done to obtain high volumetric yield clones with good density and high Modulus of Elasticity (MOE). Moreover, early evaluation of these properties, knowing its relation with the properties in adult stages, determines a time gain to select best clones. In this thesis, the physical property “basic density” and mechanical property “Modulus of Elasticity” (MOE) from wood of 26 *Eucalyptus grandis* clones was evaluated in the North zone of Uruguay (Rivera). Both properties were determined through direct methods: UNIT norm 237:2008 for basic density and UNIT norm 1137:2007 for elasticity mode. The material used for the evaluation was 26 clones, previously chosen by their volumetric yield in forestry soils from Rivera. Clones ages were 4, 5 and 6 years. Three trees per clone were harvested and a piece of wood –more or less 5cm wide– from every tree at the breast high was taken. A small log of approximately 80 cm was also taken and both materials were transported to the lab to measure its basic density and modulus of elasticity respectively. Both properties were determined by direct and in-direct methods and its correlation was estimated. In the case of basic density, Pilodyn instrument was used while Fakopp was used to determine elasticity module. Lastly, the clones were ranked according to both properties.

Key words: *Eucalyptus grandis*; Clones; Wood properties; Basic density; Pilodyn; Module of elasticity; Fakopp.

9. **BIBLIOGRAFÍA**

1. ACHUGAR, L.A.; SCAGLIONE, G. 2003. Evaluación de propiedades de la madera en clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 97 p.
2. ALATAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVARRÍA, A.; PANARIO, D.; PUENTES, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. t.1, 96 p.
3. DOLDAN, J. 2003. Indicadores de calidad de madera *Eucalyptus grandis* de Rio Negro, Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 20 p. (Informe de Investigación. Serie Forestales no. 9).
4. DOWNES, G.; HUDSON, I.; RAYMOND, C.; DEAN, G.; MICHELL, A.; SCHMILECK, L.; EVANS, R.; MUNERAI, A. 1997 Sampling plantation *Eucalyptus* for wood and fiber properties. Sidney, Australia, CSIRO. 132 p.
5. FERNÁNDEZ, E. 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.
6. FINOCCHIETTI, S. 2005. Estudio de la variación axial de la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) para la determinación del punto de muestreo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 100 p.
7. GARCÍA, G.; TARIGO, J. 2006. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 75 p.
8. GREAVES, B.L.; BORRALHO, N.M.G.; RAYMOND, C.A., EVANS, R. 1997. Age-age correlations in, and relationships between basic density and growth in *Eucalyptus nitens*. *Silvae Genetica*. 46: 264-270.

9. HANSEN, C. 2000. Application of the Pilodyn in forest tree improvement. Humlebaek, Denmark, Danida Forest Seed Centre. 11 p. (DFSC Series of Technical Notes. TN55).
10. LIMA, J.; ROSADO, S.; TRUGILHO, P. 2001. Assessment of wood density of seven clones of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal. no 191: 21-27.
11. LÓPEZ, J.A.; STAFFIERI, G.M. 2002. Correlaciones genéticas entre Pilodyn y densidad de la madera de *Pinus elliotti* var. *elliotti* en la Mesopotamia Argentina. In: Jornadas Técnicas Forestales (9as., 2002, El Dorado, Misiones, Argentina). Memorias. Bella Vista, Corrientes, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. p. irr.
12. O'NEIL, H.; TARIGO, F.; IRAOLA, P. 2004. Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte de Uruguay. Montevideo, LATU. 44 p. (Informe no.4)
13. PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OTHA, S. 2000. Ensayo de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Montevideo, LATU/JICA. 24 p. (Informe de Investigación no. 1)
14. PÉREZ DEL CASTILLO, A. 2001a. Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliotti* del Sur de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA 25 p. (Informe de Investigación no.7)
15. _____. 2001b. Propiedades mecánicas y calidad de madera de *Eucalyptus grandis* del norte de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 40 p. (Informe de Investigación no.4)
16. _____.; VENTURINO, A. 2003. Resumen de las propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliotti* y *Pinus taeda* de distintas zonas del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 29 p. (Informe de Investigación no.14)
17. _____. 2006. Maderas; acondicionamiento de las maderas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos. Norma UNIT 362:2006. Montevideo, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. 4 p.

18. _____. 2007. Método de ensayo para la determinación de los módulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estática en maderas. Norma UNIT 1137:2007. Montevideo, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. 10 p.
19. _____. 2008. Determinación de la densidad aparente en maderas. Norma UNIT 237:2008. Montevideo, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. 12 p.
20. TUSET, R.; DURÁN, F. 2008. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
21. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 1999. Wood handbook; wood as an engineering material. Madison, Wisconsin. 428 p. (Agriculture Handbook no. 72)
22. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES. COMISION NACIONAL DE ESTUDIO AGROECONÓMICO DE LA TIERRA. 1994. Índice de productividad Grupos CO.N.E.A.T. Montevideo. 182 p.

10. ANEXOS

El cuadro siguiente muestra la clasificación de densidades según el criterio alta o baja densidad, discutido en el sub-capítulo 4.3.1.2.

Anexo. 1 Clasificación de clones según la densidad

Observación	Clon	Densidad básica (gr/cm ³)	Tuckey (p < 0,05)	Clase (criterio 1)	Clase (criterio 2)
1	SS 24	0,405	A	Alta	Alta
2	SS 19	0,404	A	Alta	Alta
3	B 23	0,398	A	Alta	Alta
4	SS 17	0,377	AB	Alta	Media
5	SS 9	0,377	AB	Alta	Media
6	SM 13	0,375	AB	Alta	Media
7	T 65	0,374	AB	Alta	Media
8	TT 775	0,374	AB	Alta	Media
9	SS 12	0,371	AB	Alta	Media
10	SS 20	0,371	AB	Alta	Media
11	T 296	0,371	AB	Alta	Media
12	SS 8	0,370	AB	Alta	Media
13	SM 24	0,370	AB	Alta	Media
14	SS 10	0,369	AB	Alta	Media
15	SS 22	0,367	AB	Baja	Media

16	T 231	0,366	AB	Baja	Media
17	SS 13	0,359	AB	Baja	Baja
18	SM 27	0,359	AB	Baja	Baja
19	SS 6	0,356	AB	Baja	Baja
20	SS 1	0,353	AB	Baja	Baja
21	SS 16	0,345	AB	Baja	Baja
22	T 256	0,344	AB	Baja	Baja
23	B 38	0,339	AB	Baja	Baja
24	SM 1	0,337	AB	Baja	Baja
25	SM 31	0,320	B	Baja	Baja

El clon B6 no se tomó en cuenta en esta clasificación porque el valor de correlación entre la densidad básica y el Pilodyn distorsionaba los valores de correlación total. Sin embargo, el valor es el siguiente.