

ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA MEDIANTE EL USO DE PILODYN EN LA SELECCIÓN DE CLONES DE *Eucalyptus pellita* F. Muell

Indirect estimation of wood density for selection of *Eucalyptus pellita* F. Muell. clones using pilodyn

Palabras clave: densidad básica, genética, heredabilidad, método no destructivo, selección clonal

Key words: basic density, genetic, heritability, non-destructive method, clonal selection.

Diana Lucia Giraldo Charria¹

Víctor Manuel Nieto Rodríguez²

Mónica Sarmiento³

Nuno Borralho⁴

RESUMEN

Se presentan los resultados del uso de Pilodyn para la medición indirecta de la densidad de la madera, comparado con un muestreo no destructivo por tarugos y un método directo o destructivo por colecta de secciones del fuste (discos). Se validó el uso del Pilodyn como criterio de selección y método alternativo para la valoración de la densidad en árboles en pie. El análisis se efectuó en 10 de los mejores clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. desarrollados en el programa de mejoramiento de la empresa Reforestadora de la Costa en la Orinoquia colombiana. La determinación de la densidad por tarugos y rodajas se basó en el método de inmersión y desplazamiento de agua. Se confirmó la alta densidad de la madera de *E. pellita*, con un promedio de 580 kg/m³. Los valores de heredabilidad obtenidos para los tres métodos fueron altos y cercanos entre sí (de 0.47 a 0.55). Las correlaciones fenotípicas y genéticas entre los métodos directos (tarugos y rodajas) y el método indirecto por Pilodyn fueron de moderadas a altas (de 0.45 hasta 0.96). Estos resultados indican que

el uso de Pilodyn puede resultar en una estrategia eficiente para estimar de manera indirecta la densidad a nivel clonal, lo que permite incluir de manera sencilla esta variable como criterio de selección de clones, especialmente cuando deben evaluarse muchos individuos por clon. Por otro lado, las estimaciones de densidad en árboles individuales con Pilodyn muestran que el método no es recomendable para ser aplicado en selecciones individuales.

ABSTRACT

The study presents the results of a comparison between Pilodyn and other direct estimates such as disks and cores, to determine wood density of *Eucalyptus pellita* F. Muell clones. The accuracy of Pilodyn as a reliable selection criteria for determining the density in standing trees was evaluated. The analysis was based on a collection of ten clones developed by Reforestadora de la Costa, in the Orinoquia of Colombia as part of their breeding program. Wood density of cores and disks were calculated based on the standard water

¹ Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). dlgiraldoc@gmail.com, Autor para correspondencia. dlgiraldoc@conif.org.co

² Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). victornieto@conif.org.co

³ Reforestadora de la Costa (REFOCOSTA). monicas@refocosta.com

⁴ Consultor internacional. nunoborralho@sapo.pt

<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a04>

Para citar este artículo: Giraldo Charria D. L., Nieto Rodríguez V. M., Sarmiento M., Borralho N. (2014) Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Colombia Forestal, 17(2), 181-192.

displacement method. The results confirm *E. pellita* is a high density species, with an average value of 580 kg/m³, based on disks. The estimates of clonal heritability for the three methods were high and similar (between 0.47 and 0.55), as were the phenotypic and genetic correlations between them (between 0.43 and 0.96). This indicates that Pilodyn is an effective indirect selection tool for assessing wood density of *E. pellita* clones, especially when many individuals need to be assessed per clone. However, Pilodyn is not recommended as a tool for selecting individuals.

INTRODUCCIÓN

Eucalyptus pellita es una de las especies mejor adaptadas a las condiciones de bosque húmedo tropical típicas en la zona del Piedemonte, en el noroeste de la Orinoquia colombiana. Se trata de una especie de muy buen crecimiento y sanidad, con valores de alrededor de los 25 a 40 m³/ha/año. En la región, esta especie fue introducida por la Reforestadora de la Costa ([REFOCOSTA, 2010](#)) en ensayos de evaluación desde el año 1992 y actualmente es una de las especies usadas por la empresa y por otros reforestadores en la región.

En el año 2008 se introdujeron nuevas procedencias de origen australiano las cuales fueron evaluadas en ensayos de crecimiento y adaptación. De igual manera, a partir de la colección inicial se obtuvieron por primera vez clones de esta especie, con los cuales se han generado ensayos clonales ([Nieto & Gasca, 2010](#)). Dichos ensayos han sido evaluados en términos de su crecimiento en diámetro y altura.

En el contexto de los objetivos del mejoramiento genético forestal, el crecimiento y la calidad de la madera, en especial su densidad, son consideradas variables fundamentales que han sido utilizados como criterio de selección de árboles plus y en la evaluación de los ensayos genéticos ([Zobel & Talbert, 1992](#); [Fonseca et al., 2010](#)).

Estudiar la densidad tiene ventajas importantes para la calificación del uso sólido y estructural de la madera ([Zobel & Talbert, 1992](#)). De esta manera, la densidad tiene influencia positiva sobre el módulo

de elasticidad, así como para la clasificación de la madera cuando el destino final es la producción de pulpa o los mercados energéticos, dado que está directamente relacionada con el alto rendimiento pulpable y bajo consumo específico ([Downes et al., 1997](#)).

Generalmente la toma de muestras para la determinación de las propiedades de la madera implica costosas inversiones, además de un proceso destructivo del árbol, por lo que en la mayoría de los programas de mejoramiento la evaluación de esta variable se restringe a tan solo algunas decenas de árboles ([Zobel & Van Buijtenen, 1989](#); [Wu et al., 2010](#)).

Con el propósito de evaluar un mayor número de árboles y a fin de generar conclusiones amplias sobre la densidad, es necesario tener un esquema de valoración no destructivo ([Gouvêa et al., 2011a](#)). Para esto surge la posibilidad del uso de tarugos, ya sea por colecta manual o asistida por taladro ([Downes et al., 1997](#)). El uso de tarugos permite una evaluación directa de la densidad, sin impactar significativamente en el crecimiento y desarrollo futuro del árbol. Sin embargo, es un método lento, que demanda el procesamiento de muestras en campo y su posterior medición en laboratorio. Adicionalmente, la medición de densidad por tarugos implica el manejo de pequeños volúmenes irregulares que tiene un alto error experimental.

Como alternativa a estos métodos directos de medición, el Pilodyn constituye un método indirecto que ha sido ampliamente usado en programas de mejoramiento forestal alrededor del mundo ([Pilegaard, 2000](#)). Este es un equipo portátil que dispara una aguja inyectora a fuerza constante, el cual permite medir la distancia de penetración de la aguja en la madera, siendo su valor inversamente proporcional a la densidad ([Wu et al., 2010](#), [Couto et al., 2013](#)).

Algunas investigaciones en *Eucalyptus* han demostrado que los resultados obtenidos con Pilodyn tienen una precisión moderada a nivel del árbol individual, pero aceptable para la determinación de valores agregado de clones

y/o familias. Algunos autores ([Dean et al., 1990](#); [Tibbits et al., 1990](#); [Greaves et al., 1996](#); [Gea et al., 1997](#); [Raymond & MacDonald, 1998](#); [Callister & England, 2010](#)) presentan correlaciones fenotípicas (*i.e.* al nivel del árbol individual) entre Pilodyn y densidad de discos de -0.40 a -0.70, para las especies *E. globulus* y *E. nitens* con edades entre los 5 y 10 años. Igual resultado se encontró en eucaliptos tropicales tales como el *E. urophylla* y sus híbridos, y *E. camaldulensis* ([Wei & Borralho, 1997](#); [Kien et al., 2010](#); [Wu et al., 2010](#); [Gouvêa et al., 2011b](#)). Por el contrario a nivel de promedio de procedencias, familias o clones las correlaciones son en general próximas a uno ([Raymond & MacDonald, 1998](#)).

No obstante las altas correlaciones genéticas, se han encontrado bajos niveles de heredabilidad en Pilodyn (h^2 entre 0.13 – 0.27), mientras que para densidad los valores son en general más altos (h^2 de 0.67 a 1) ([Raymond, 2002](#)). De esta manera el Pilodyn permite evaluar muchos más candidatos, asegurando intensidades de selección altas, lo cual compensa la disminución marginal en su precisión de selección (por su menor heredabilidad y una correlación genética menor que 1 con la densidad). Finalmente, en la mayoría de los programas de selección genética el Pilodyn permite lograr, para condiciones similares de costo, ganancias genéticas semejantes o incluso superiores a los de una selección directa por disco o por tarugo ([Greaves et al., 1996](#); [Wei & Borralho, 1997](#)).

En Colombia no hay aún demasiada experiencia en el uso del Pilodyn y mucho menos en *E. pellita*. Por lo que este trabajo tiene por objetivo evaluar la eficiencia de dicho método como mecanismo de valoración indirecta de la densidad en *E. pellita*, en comparación con otros métodos alternativos como la colecta de tarugos.

MATERIALES Y MÉTODOS

ENSAYO CLONAL

Los árboles analizados en este trabajo fueron colectados de un ensayo clonal establecido en 2008 por la alianza CONIF – Refocosta en predios de la empresa Reforestadora de la Costa, en inmediaciones del municipio de Villanueva, Casanare (04°39'10.73"

latitud norte - 72°54'58.76" longitud oeste y 420 msnm). Los distintos clones están ubicados en parcelas lineales no replicadas con un número variable de árboles. En general, las parcelas son relativamente pequeñas (entre 20 y 120 árboles por clon) distribuidas en cuatro líneas de plantación con distancias de siembra iguales. Ya que las condiciones de suelo del predio son muy homogéneas, se estima que la ausencia de replicación no va a tener impacto significativo en la comparación de la densidad entre clones.

Los clones representados en el ensayo fueron seleccionados por presentar los mejores crecimientos en diámetro y altura. Dichos clones son copias de árboles plus seleccionados fenotípicamente a los 13 años de edad (con características sobresalientes para crecimiento y rectitud en comparación con el promedio de sus vecinos), en plantaciones operativas de la empresa. El origen de todos los clones, ahora estudiados, es material genético reproducido a partir de lotes de semilla procedentes de Nueva Guinea (la mayoría de Papúa Nueva Guinea y algunos de Irian Jaya).

De este ensayo fueron seleccionados 100 árboles (10 árboles por 10 clones) de cinco años de edad, los cuales se muestrearon con Pilodyn, y con toma de muestra de tarugos por barreno Pressler de 5 mm de diámetro, ambos a 1.30 m de altura, previo a la tala para toma de discos a igual altura.

MEDICIÓN DE DENSIDAD EN CAMPO PARA PILODYN

En cada uno de los árboles seleccionados para muestreo se identificó el punto de toma de muestras a 1.30 m de altura. Sobre este lugar se descortezó un área de aproximadamente de 5 x 5 cm, hasta llegar al punto de madera viva, buscando generar el suficiente soporte a los apoyos de tara del equipo. Previo a la toma del dato, se verificó que los puntos de muestreo estuvieran libres de cualquier defecto como nudos o bolsas de resina. De acuerdo con el manual de operación del equipo, el pin de fresado fue forzado dentro del cuerpo del Pilodyn hasta cargar la unidad. Luego, la parte frontal del equipo se presionó firmemente contra el fuste para evitar el deslizamiento o movimiento del instrumento, garantizando que el

pin de fresado estuviera señalando hacia el centro del fuste. Cuando el Pilodyn estaba ajustado contra el árbol se presionaba el disparador. La profundidad de penetración del pin de fresado del Pilodyn (leída en mm) se midió al tiempo que se presionaba contra el fuste del árbol. Cuando la penetración se había leído, el pasador del equipo se extraía del árbol cuidando que este no fuera doblado. Después de la primera medición se realizó otra a 90° del primer punto de medida (Pilegaard, 2000).

El modelo de Pilodyn utilizado fue el 6J-Forest cuya fuerza de penetración es 6 julios (6 N/m),

profundidad de penetración 0-40 mm y diámetro de perforación 2.5 mm (Figura 1).

Toma de muestra de discos y tarugos en campo

Luego de la medición con Pilodyn se extrajeron tarugos a través de un barrenado Pressler– (Increment Borer SUUNTO de 300 mm / 400 mm y 5mm de diámetro) de 2 espirales para madera de alta densidad y resinosa (Instrumenta Mechanik Labor System, 2009). Las muestras extraídas (una por árbol), denominadas tarugos, fueron marcadas y dispuestas en colectores plásticos con agua para evitar la pérdida de humedad y fractura.



Figura 1. Medición con Pilodyn a través del disparo de una aguja

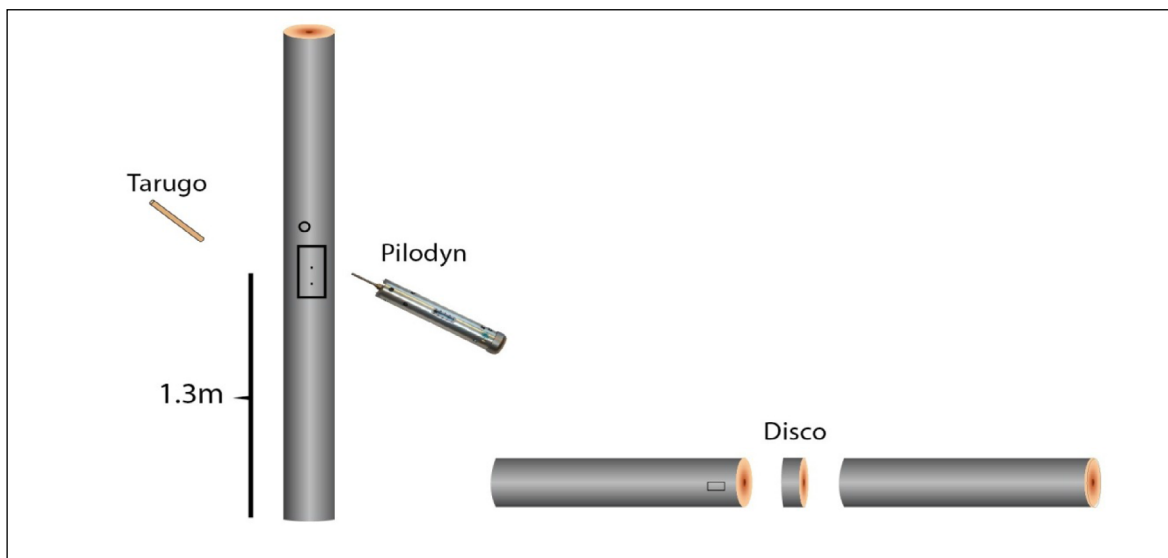


Figura 2. Esquema del proceso realizado en campo

Finalmente, los árboles fueron apeados y se extrajeron secciones de fuste o discos de madera (uno por árbol) sobre el mismo punto de toma de muestras, cuidando que no tuvieran marcas del brocado generado por el barreno Pressler. Los discos obtenidos, con espesor promedio de 4 cm, fueron marcados y empacados en bolsas, para envío a laboratorio. (Figura 2).

Procesamiento de muestras de discos y tarugos en laboratorio

Los procesos metodológicos en laboratorio buscaban estimar el Peso en verde (Punto máximo de saturación en agua), Volumen verde (empleando el método de desplazamiento de agua) y Peso seco (Peso constante después de la pérdida de agua por secado en estufa).

Medición de volumen verde de las muestras

Las muestras tomadas en campo se mantuvieron en condiciones de humedad (en bolsas selladas y recipientes herméticos luego de su recolección); además, como proceso preliminar en laboratorio se descortezaron los discos y fueron sometidos a humedad constante durante cuatro días, sumergiendo en agua durante este lapso.

Dado que las muestras extraídas del árbol, discos y tarugos, presentaron formas irregulares y los métodos dimensionales pueden generar datos erróneos al sobrestimar el volumen verde, se siguió el método volumen por inmersión en agua de la norma ASTM D2395 (American Society for Testing and Materials, 2001). En este método el peso del agua desplazada es igual al volumen de la muestra, el nivel del agua aumenta cuando la muestra se encuentra totalmente sumergida (sin tocar los bordes del recipiente) y se estima la equivalencia de $1\text{g} = 1\text{cm}^3$. Por lo tanto, la lectura del resultado arrojado por la balanza es igual al volumen de la pieza de madera sumergida (Pan-Amazonian, 2006).

Secado de las muestras. Peso seco

Después de obtener el volumen verde, las muestras fueron dispuestas para ser secadas en estufa a

105°C continuos según lo dispuesto en la norma Tappi T258 om-11 (TAPPI, 2011) hasta alcanzar peso constante. Para que el secado fuera más efectivo y rápido, todas las piezas fueron colocadas de manera que no se tocaran entre ellas sobre láminas metálicas que consiguen dispersar el calor de forma uniforme. Después de conseguir el peso seco constante, se calculó la densidad básica con los datos de Volumen verde y Peso seco, con base en la ecuación:

$$Db = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen verde}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para obtener el valor de densidad y Pilodyn de cada clon y determinar las varianzas y covarianzas entre variables se usó el modelo lineal de tipo:

$$Y = \mu + cl + e$$

En el que Y es el vector de mediciones (de Pilodyn, densidad por rodaja y por tarugo), μ es el valor promedio del ensayo, cl el efecto aleatorio debido a los clones y e los residuales.

Con el objetivo de establecer cuál es la relación entre las mediciones de Pilodyn (PIL) y densidad por discos y tarugos, se ajustó una regresión lineal simple de tipo:

$$Den = a + b.PIL + e$$

En donde a y b son los coeficientes de intercepto y pendiente de la regresión respectivamente y e los residuales. El ajuste de los modelos lineales y respectivas soluciones para clones y predicción de varianzas se realizaron con el software AsReml (Gilmour *et al.*, 1998).

La heredabilidad (en sentido amplio) de las densidades de rodaja y tarugos se estimó como:

$$H^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + \sigma_e^2}$$

La heredabilidad para Pilodyn (también, en sentido amplio) se estimó como:

$$H^2 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + 2 \times \sigma_e^2}$$

La necesidad de multiplicar por 2 la estimación de la varianza del error se debe a que la medición usada se basó en el promedio de 2 lecturas. Las estimaciones del error estándar para heredabilidades y las respectivas correlaciones genotípicas o clonales se estimaron con base en el método designado de *Delta* (Lynch & Walsh, 1998), tal como está implementado en AsReml.

RESULTADOS

El valor de densidad por rodaja a los cinco años fue en promedio de 579.5 kg/m³ (±48.6), un poco más alto que el obtenido por tarugos (530.2±55.0 kg/m³), a lo que correspondió un valor de Pilodyn de 14.5 mm (±3.35).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la densidad basada en el tarugo fue 10% menor que la densidad de disco. Sin embargo, la relación entre las densidades por tarugo y disco fue de manera general razonable, con un coeficiente de determinación R² de 0.4828 y un p-valor de 2.087e-15 (α=0.05). En la [Figura 3](#) se representan todos los individuos muestreados con sus respectivos valores para densidad por disco y por tarugo.

VARIANZAS Y HEREDABILIDAD

La estimación de la heredabilidad para las tres variables fue similar y consistentemente alta (H² entre 0.47 y 0.55). El resultado obtenido en este estudio ([Tabla 1](#)) presenta al Pilodyn con una heredabilidad de 0.55, muy similar a la calculada a partir de las mediciones directas de disco (0.47) y de tarugo (0.51).

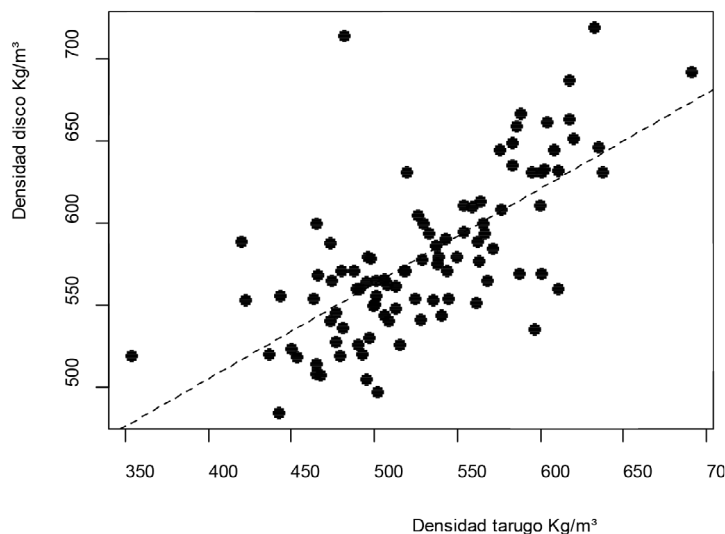


Figura 3. Densidad de disco: DD (kg/m³) y de tarugos: DT (kg/m³) colectados a 1.30 m en clones de *E. pellita* a los cinco años. La línea corresponde a la relación expresada por la regresión DD= 272.04 + 0.585DT.

Tabla 1. Estimación de varianzas entre clones y residual, heredabilidad en sentido amplio y error estándar para densidad de disco, densidad de tarugo y Pilodyn (entre paréntesis)

Variable	Varianza entre clones	Residual	Heredabilidad
Densidad			
Disco	1165.35	1302.66	0.47 (0.14)
Densidad	1650.35	1580.47	0.51 (0.14)
Tarugo	2.5379	1.07419	0.55 (0.13)
Pilodyn			

RELACIÓN ENTRE VARIABLES

La [Figura 4](#) ilustra la relación a nivel de árbol individual (mezclando todos los árboles de todos los clones), entre Pilodyn y densidad medida por disco y por tarugo. Se puede observar que la relación es inversa (cuanto mayor es la penetración, menor es la densidad), aunque con un valor de ajuste modesto. Los correspondientes valores de correlaciones fenotípica y genética entre variables se presentan en la [Tabla 2](#).

La correlación fenotípica entre Pilodyn y la densidad basada en discos fue de $r_p = -0.50$, un poco mejor que la observada entre Pilodyn y la densidad de tarugos ($r_p = -0.36$). Por su parte, las correlaciones genéticas, que representan aproximadamente la relación genética entre los valores de cada clon para las dos variables, muestran un valor entre Pilodyn y la densidad de

disco de $r_G = -0.64$, mientras que entre Pilodyn y la densidad de tarugos fue de $r_G = -0.43$.

La [Tabla 3](#) presenta los parámetros estimados de las regresiones lineales entre variables a nivel de árbol individual. En el caso de la relación entre Pilodyn y la densidad de discos, la pendiente (b en la regresión), indica que hay un cambio de 13.2 kg/m^3 en la densidad básica promedio por cada mm de penetración de Pilodyn.

Los coeficientes de determinación encontrados (R^2) para los datos de árboles individuales de Pilodyn con discos o tarugos fueron bajos; no obstante, los valor-p hallados para las pendientes indican que los modelos son significativos ($\alpha = 0.05$). Es posible inferir que la variable de regresión (Pilodyn) explica de forma deficiente aunque significativamente (con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$) la variable densidad por los métodos de discos y tarugos al nivel del árbol individual, como se puede observar en la [Tabla 3](#).

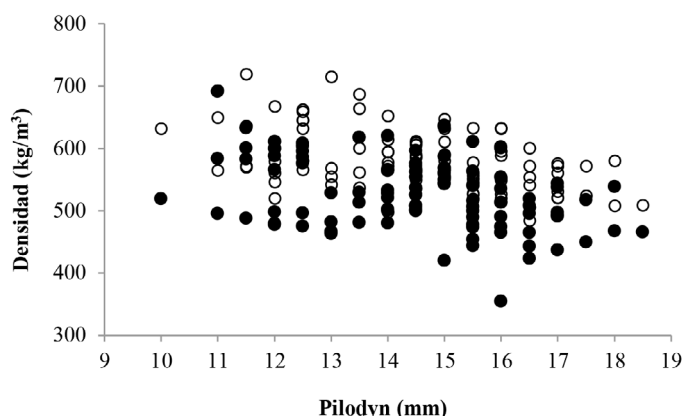


Figura 4. Relación al nivel de árbol individual, entre Pilodyn (promedio de 2 lecturas), densidad de discos (○) y densidad de tarugos (●). Todos los valores fueron tomados a 1.30 m

Tabla 2. Correlaciones genéticas o clonales (arriba de la diagonal) y fenotípicas (debajo de la diagonal) entre densidad de disco, densidad de tarugo y penetración de Pilodyn. Los errores estándar están entre paréntesis

MÉTODO	Discos	Tarugos	Pilodyn
Discos		0.96 (0.05)	-0.64
			(0.22)
Tarugos	0.71 (0.08)		-0.43
			(0.29)
Pilodyn	-0.50 (0.15)	-0.36 (0.19)	

Tabla 3. Parámetros de la regresión $Densidad = a + b.Pil$ de predicción de densidad (de disco y tarugo) con base en el promedio de dos mediciones de Pilodyn

Método	a	b (valor-p)	Error Estándar	R ₂
Disco	770.9	-13.2 (<0.001)	42.6	0.238
Tarugo	690.7	-11.1 (<0.001)	52.4	0.136

Por el contrario, la relación entre el promedio de Pilodyn para cada clon y su valor de densidad por disco fue superior (Figura 5). Se evidencia como los valores de penetración con Pilodyn son inversamente proporcionales a las densidades por discos y tarugos. De esta manera, en la mayoría de clones en donde se presentaron los más altos valores de penetración promedio (en este caso los superiores a 15 mm) se obtuvieron los menores valores de densidad por los dos métodos directos.

DIFERENCIAS ENTRE CLONES PARA DENSIDAD Y PILODYN

La Tabla 4 presenta los valores de densidad de los distintos clones de *E. pellita* representados en el ensayo. Las densidades de los clones a partir de discos, definen un rango entre 525 kg/m³ y 636 kg/m³ el cual es notoriamente amplio para una variable como densidad que es normalmente poco variable.

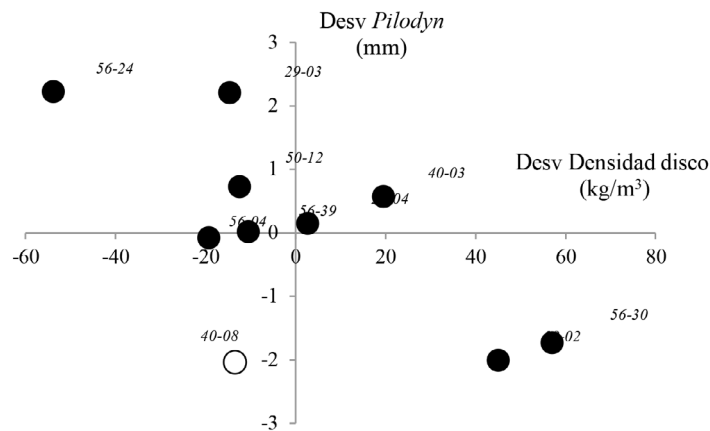


Figura 5. Promedios clonales para Pilodyn (P, desviaciones en mm del promedio del ensayo) y de Densidad de disco (DD, desviaciones en kg/m³ del promedio del ensayo). Modelo de regresión lineal simple $Desv DD = 0.001322 + -14.165246DesvP$ y $R^2 = 0.4577$

Tabla 4. Densidad de discos, tarugos y Pilodyn de los clones de *E. pellita* estudiados

Clon	Densidad Disco (kg/m ³)	Densidad Tarugo (kg/m ³)	Pilodyn (mm)
18-02	624.0	573.0	12.5
40-03	598.6	567.6	15.1
29-03	564.3	508.1	16.7
50-12	566.5	532.9	15.2
29-04	581.7	550.1	14.6
56-24	525.1	472.4	16.7
56-39	568.5	494.0	14.5
40-08	565.5	486.1	12.5
56-30	636.0	585.7	12.8
56-04	559.7	525.2	14.4

La relación entre los valores clonales estimados para Pilodyn y la densidad de discos es buena (R^2 de 0.46, [Figura 5](#)), y como se comentó, superior que la relación al nivel de árbol individual ([Figura 4](#)), excepto para uno de los clones (40-08) que presentó un valor de penetración de Pilodyn excepcionalmente bajo para la densidad arrojada. Este resultado apoya la correlación genética encontrada entre Pilodyn y la densidad por discos (-0.50).

DISCUSIÓN

Los valores de densidad encontradas para *E. pellita*, en árboles con cinco años de edad, confirman que la especie tiene un alto valor de densidad de madera, característica reconocida en otros estudios ([Pereira et al., 2000](#); [Oliveira et al., 2010](#); [Harwood, 1998](#)).

En general la densidad alta es una característica deseable para distintos usos finales de la madera. Es importante para bajar el consumo específico de madera; en el caso de su uso para celulosa, *-i.e.* son necesarios menos metros cúbicos de madera para producir una tonelada de pulpa, ([Borralho et al., 1993](#); [Wimmer et al., 2002](#))-. Para el caso particular de las plantaciones de eucalipto en la Orinoquia, significa también menores costos de transporte, una ventaja importante en el negocio global de exportación de *chips*. Asimismo, para algunos usos energéticos en que hay una relación directa entre la densidad de madera, el valor calorífico y la calidad del carbón ([Oliveira et al., 2010](#)). En el caso del uso de madera para fines estructurales, sea en piezas aserradas o postes, una alta densidad es favorable, pues está relacionada con el módulo elástico de tensión ([Yang & Evans, 2003](#)).

La diferencia reportada entre las densidades de disco y tarugo, ambas colectadas a 1.30 m de altura, es un resultado esperado. En el disco (una sección del fuste) las proporciones en volumen de los distintos anillos de crecimiento son las mismas que en el fuste del árbol, mientras que el tarugo es un cilindro que presenta una mayor proporción de madera del duramen (de los primeros anillos) que de la albura (de los últimos anillos). Como en general la densidad se incrementa significativamente desde

el duramen a la albura, la densidad del tarugo es una estimación sesgada, por defecto, de la densidad a un determinado nivel del fuste, cuando es comparada con la estimación de densidad por discos.

VARIANZAS Y HEREDABILIDAD

Se ha mostrado en varios estudios que la heredabilidad de la densidad de la madera es alta ([Raymond, 2002](#)). No obstante, hay muy pocas estimaciones en *E. pellita* ([Susilawati & Fujisawa, 2002](#); [Susilawati & Marsoem, 2006](#)) en las cuales se han obtenido valores entre 0.4 y 0.7.

Pese a que los valores de heredabilidad (en sentido amplio) fueron similares en los tres métodos (Pilodyn, disco y tarugo), la precisión de la estimación de densidad con base en el Pilodyn a nivel de árbol individual es limitada.

RELACIÓN ENTRE VARIABLES

Para que el Pilodyn sea un buen método de estimación indirecta de la densidad de cada clon es necesario que tenga una alta heredabilidad, y además que su correlación con la densidad medida a través de métodos directos sea lo más alta posible ([Falconer & Mackay, 1996](#)). En este sentido tanto para las correlaciones fenotípicas como genéticas a nivel clonal se obtuvieron valores negativos al relacionar Pilodyn con las densidades basadas en discos y tarugos. Fenotípicamente esto indica que la penetración que se obtiene con este instrumento es menor cada vez que la densidad aumenta ([Tabla 2](#)). A nivel genético, el valor negativo indica que los genes que están asociados a densidades altas (medidas a través de discos o tarugos) son los mismos que generan valores bajos de penetración por Pilodyn.

Las correlaciones entre densidad obtenida por discos y tarugos fueron altas tanto a nivel fenotípico como genético, lo que muestra que ambas representan prácticamente la misma variable ([Falconer & Mackay, 1996](#)). No obstante, es de esperar que la medición por tarugo tenga menor precisión que la medición por disco, ya que no solo corresponde a un menor volumen de madera

muestreado con relación al fuste, sino que también la determinación en laboratorio del volumen verde puede presentar alguna dificultad experimental.

Los valores de las pendientes para las regresiones entre densidad medida a través de discos y por tarugos con Pilodyn son muy cercanos de los estimados por [Resquin et al. \(2006\)](#) y [Thiersch et al. \(2006\)](#) para el híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* y *E. grandis*, respectivamente.

CONCLUSIONES

El uso de Pilodyn resulta en una estrategia poco eficiente para la estimación de la densidad en campo al nivel de árboles individuales, debido a las modestas correlaciones; sin embargo, al nivel promedio de clones resulta ser muy eficiente (ya que su heredabilidad es alta y tiene una alta correlación genética con la densidad), permitiendo evaluar de manera sencilla la densidad de clones sin incurrir en grandes esfuerzos de medición.

Por su parte, la colecta de tarugos permite evaluar la densidad de árboles individuales de modo más riguroso que el Pilodyn (la correlación genética con densidad es superior que la de Pilodyn); sin embargo, es un método más costoso y lento de implementar.

La alta heredabilidad de la densidad por discos, tarugos y Pilodyn, y su cercanía entre sí, además de su alta correlación genética, revelan que se tratan de variables prácticamente equivalentes, desde el punto de vista de criterio de selección.

Así, en la mayoría de clones, se comprueba que hay una estrecha relación, inversa, de los datos generados por Pilodyn y densidad; en donde, a mayor densidad menor es la penetración de la aguja del Pilodyn en el árbol, situación confirmada por la correlación genética encontrada.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto “Consolidación de la estrategia de mejoramiento

genético de la especie *Eucalyptus pellita* F. Muell, para el establecimiento de una fuente de suministro de material clonal de alta calidad en la región de la Orinoquia colombiana”, suscrito entre la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal – CONIF y la Reforestadora de la Costa-Refocosta SAS, bajo la convocatoria de Cierre de Brechas N° 586 de 2012 de COLCIENCIAS. Los autores agradecen a Refocosta por permitir la tala de árboles para la toma de datos y a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en especial al laboratorio de suelos de la Facultad de Medio Ambiente que facilitó el procesamiento de las muestras y la toma de datos en laboratorio. A las estudiantes de ingeniería forestal Adriana Rodríguez y Sandra Díaz, por su competente labor en el procesamiento de las muestras en laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Society for Testing and Materials.** (2001). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ANSI/ASTM Vol. 4. 09; D2395.
- Borralho, N., Cotterill, P. & Kanowski, P.** (1993). Breeding objectives for pulp production of *Eucalyptus globulus* under different industrial cost structures. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 648-656.
- Callister, A. & England, N.** (2010). How dense is my blue gum? prediction of whole-tree basic density of *Eucalyptus globulus*. *New Forests*, 40 (2), 153-164.
- Couto, A., Trugilho, P., Andrade, T., Protásio, T. & Sá, V.** (2013). Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*, 19 (1), 27-34.
- Dean, G., French, J. & Tibbits, W.** (1990). Variation in pulp making characteristics in a field trial of *Eucalyptus globulus*. In: 44th Annual Appita General Conference, Rotorua, New Zealand.

- Downes, G.M., Hudson, I.L., Raymond, C.A., Dean, G.H., Michell, A.J., Schimleck, L.R., Evans, R. & Muneri, A.** (1997). Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties. (pp. 1-10). Collingwood: CSIRO Publishing.
- Falconer, D. & Mackay, T.** (1996). Introduction to quantitative genetics. Agricultural Research Council's. Unit of Animal Genetics. University of Edinburg. 4ta Ed. Prentice Hall. 464 p.
- Fonseca, S., Resende, M., Alfenas, A., Guimarães, L., Assis, T., & Grattapaglia, D.** (2010). Manual prático de melhoramento genético do eucalipto. (pp. 39-42). Editora UFV - Universidade Federal de Viçosa.
- Gea, L., McConchie, R. & Borralho, N.**(1997). Genetic parameters for growth and wood density traits in New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science, 27 (3), 237-244.
- Gilmour, A.R., Cullis, B.R., Welham, S.J. & Thompson, R.** (1998). ASREML Users' Manual. New South Wales Agriculture, Orange: Orange Agric. Inst.
- Gouvêa, A., Trugilho, P., Gomide, J., Moreira, R., Andrade, C. & Nogueira, I.** (2011a). Determinação da densidade básica da madeiras de eucalyptus por diferentes métodos não destrutivos. *Árvore*, 35 (2), 349-358.
- Gouvêa, A., Trugilho, P., Colodette, J., Bianchi, M.L., Soragi, L.C. & Oliveira, A.C.** (2011b). Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. *Scientia Forestalis*, 39 (90), 205-220.
- Greaves, B.L., Borralho, N., Raymond, C.A. & Farrington, A.** (1996). Use of Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research*, 26 (9), 1643-1650.
- Harwood, C.** (1998). *Eucalyptus pellita*. An annotated bibliography. Kingston: Csiro Forestry and Forest Products. 70 p.
- Instrumenta Mechanik Labor System.** (2009). Instruction for Use Increment Borer "SUUNTO" 300/ 400 mm. Recuperado de http://www.imlusa.com/html/increment_borer.html.
- Kien, N.D., Jansson, G., Harwood, C. & Almqvist, C.** (2010). Clonal variation and genotype by environment interactions in growth and wood density in *Eucalyptus camaldulensis* at three contrasting sites in Vietnam. *Silvae genetica*, 59 (1), 17-22.
- Lynch, M. & Walsh, B.** (1998). Genetics and Analysis of Quantitative Traits. Sunderland: Sinauer Associates Inc. 980 p.
- Nieto, V. & Gasca, G.** 2010. Experiencias y avances en el manejo de *Eucalyptus pellita* F. Muell en la Orinoquia Colombiana. Bogotá: CONIF, Ministerio de Agricultura, Refocosta S.A. 98 p.
- Oliveira, A.C., Carneiro, A.C.O., Vital, B.R., Almeida, W., Pereira, B.L.C. & Cardoso, M.T.** (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Scientia Forestalis*, 38 (87), 431-439.
- Pan-Amazonian.** (2006). Project for the advancement of networked science in Amazonian, Measuring wood density for tropical forest trees a field manual. Recuperado, de http://www.eci.ox.ac.uk/research/ecodynamics/panamazonia/wood_density_english.pdf.
- Pereira J.C.D., Sturion, J.A., Higa, A.R., Higa, R.C.V. & Shimizu, J.Y.** (2000). Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. vol 38. Colombo: Embrapa Florestas, 113 p.

- Pilegaard, C.** (2000). Application of the Pilodyn in forest tree improvement. Technical note no. 55 – Danida Forest Seed Centre. July 2000.
- Raymond, C.A.** (2002). Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Annals of Forest Science*, 59, 525-531.
- Raymond, C.A. & MacDonald, A.C.** (1998). Where to shoot your Pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, 15 (3), 205-221.
- Reforestadora de la costa [REFOCOSTA].** (2010). Recopilación de los avances en mejoramiento genético forestal. Proyecto Villanueva. Informe empresarial. (pp: 5-9) Villanueva: Refocosta.
- Resquin, F., Barrichelo, L.E.G., Silva, F.G.S., Brito, J.O. & Sansigolo, C.A.** (2006). Wood quality for kraft pulping of *Eucalyptus globulus* origins plantés in Uruguay. *Scientia Forestalis*, 72, 57-66
- Susilawati, S. & Fujisawa, Y.** (2002). Family variation on wood density and fiber length of *Eucalyptus pellita* in seedling seed orchard Pleihari, South Kalimantan. In: Rimbawanto AaS, M. (ed) Advances in genetic improvement of tropical tree species. Proceedings of the International Conference (pp 53-56), Yogyakarta, Indonesia, 1-3 October, 2002
- Susilawati, S. & Marsoem, S.N.** (2006). Variation in wood physical properties of *Eucalyptus pellita* growing in seedling seed orchard in Pleihari, South Kalimantan. *Journal of Forestry Research*, 3 (2), 123-138
- The leading association for the worldwide pulp, paper, packaging and converting industries [TAPPI].** (2011). Basic density and moisture content of pulpwood. T258 om-11.
- Thiersch, C.R., Scolforo, J.R., Oliveira, A.D., Rezende, G.D. & Maestri, R.** (2006). O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12 (3), 264-278.
- Tibbits, W.N., Dean, G. & French, J.** (1990). Wood evaluation and estimation of genetic parameters for 8 year-old *Eucalyptus globulus*. In: 44th Appita Annual General Conference, Rotorua, New Zealand 16p.
- Wei, X. & Borralho, N.** (1997). Genetic control of wood basic density and bark thickness and their relationships with growth traits of *Eucalyptus urophylla* in South East China. *Silvae genetica*, 46 (4-5), 245-249
- Wimmer, R., Downes, G., Evans, R., Rasmussen, G. & French, J.** (2002). Direct effects of wood characteristics on pulp and handsheet properties of *Eucalyptus globulus*. *Holzforchung*, 56 (3), 244-252
- Wu, S., Xu, J., Li, G., Risto, V., Lu, Z., Li, B. & Wang, W.** (2010). Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 21 (1), 68-72.
- Yang, J.L. & Evans, R.** (2003). Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61 (6), 449-452.
- Zobel, B. & Van Buijtenen, J.** (1989). Wood variation, Its causes and Control. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag 363 p.
- Zobel, B. & Talbert, J.** (1992). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales (pp.408-442). Raleigh: Limusa.