

TRABAJO CIENTÍFICO

Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus*

Genetic variation of *Eucalyptus* hybrid clones

López, J. A.¹; L. Harrand²; M. A. Marcó² y A. J. López³

Recibido en febrero de 2016; aceptado en octubre de 2016

RESUMEN	ABSTRACT
<p>Con el objetivo de estimar parámetros genéticos y superioridad/inferioridad esperada respecto a algunos materiales comerciales de <i>E. grandis</i> utilizados en la Mesopotamia Argentina se evaluó volumen individual, proporción de corteza, propiedades físicas y color del duramen de un grupo de clones híbridos de <i>E. grandis</i> con <i>E. camaldulensis</i>, <i>E. tereticornis</i> y <i>E. dunnii</i>. La información fue analizada utilizando la metodología de modelos mixtos (modelo lineal mixto univariado). Para todas las características evaluadas se detectaron diferencias altamente significativas para los efectos genotípicos, las heredabilidades en sentido amplio oscilaron entre moderadas a altas y la exactitud selectiva obtenida evidenció alta precisión en las inferencias de las medias genotípicas. Al comparar con el material de semilla mejorada de <i>E. grandis</i>, la mayoría de los clones híbridos evidenciaron alta velocidad de crecimiento, elevada proporción de corteza, alta densidad de la madera, bajo nivel de tensiones de crecimiento y una estabilidad dimensional aceptable a pesar de los altos valores de contractibilidad radial y tangencial. En cuanto al color del duramen se constató gran similitud con el testigo de <i>E. grandis</i> no pudiendo un observador promedio distinguirlas con facilidad.</p> <p>Palabras clave: Parámetros genéticos; Valores genotípicos predichos; Crecimiento; Proporción de corteza; Propiedades físicas; Color del duramen.</p>	<p>Aiming at estimating the genetic parameters and the expected superiority/inferiority of some commercial materials of <i>E. grandis</i> used in the Argentinian Mesopotamia, the individual tree volume, bark proportion, physical properties and heartwood color variables of a group of <i>E. grandis</i> with <i>E. camaldulensis</i>, <i>E. tereticornis</i> and <i>E. dunnii</i> hybrid clones were evaluated. The information was analyzed using the mixed models methodology (univariate linear mixed model). Highly significant differences were detected in all the characteristics tested for the genotypic effects, broad-sense heritability ranged from moderate to high, and the selective accuracy obtained showed high precision for the average genotypic inferences. In comparing them against those of the improved <i>E. grandis</i> seed, most of the hybrid clones showed rapid growth, high bark ratio, high wood density, low growth stresses and acceptable dimensional stability despite the high values of radial and tangential shrinkability. As to heartwood color it was found one which is very like the control and remains undistinguishable to the ordinary observer.</p> <p>Key words: Genetic parameters; Predicted genotypic values; Growth; Bark ratio; Physical properties; Heartwood color.</p>

¹ Grupo Forestal INTA, EEA Bella Vista, Corrientes. Argentina. Colonia 3 de abril, Bella Vista. Corrientes. CP 3432. CC Nro. 5. E-mail: lopez.juanadolfo@inta.gob.ar

² INTA, EEA Concordia, Entre Ríos

³ Consultor Proyecto PMSRN BIRF 7520 AR

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de plantaciones a escala comercial con híbridos interespecíficos de *Eucalyptus* se realizan hace décadas en el mundo con el fin de aprovechar la complementariedad, la adaptabilidad y la heterosis o vigor híbrido entre parentales selectos en regiones donde las especies puras tienen limitantes bióticas (plagas y enfermedades), abióticas (riesgo de heladas o sequías, restricciones edáficas), para mejorar determinadas propiedades de la madera o incrementar la capacidad rizogénica (Assis y Mafia, 2007; Harwood, 2011). Dichas plantaciones con híbridos han tenido gran notoriedad en regiones tropicales y subtropicales como Brasil, Sudáfrica y el Congo. Menor desarrollo tuvieron en regiones templadas donde las especies mejor adaptadas (principalmente *E. globulus*, *E. nitens*) presentaron dificultades para la implementación de un programa de propagación clonal comercial debido al bajo porcentaje de enraizamiento de las especies parentales e híbridos interespecíficos (Potts y Dungey, 2004). En este sentido Assis y Resende (2011) destacan que la mayoría de las casi 5 millones de hectáreas forestadas con eucaliptos en el Brasil fueron realizadas con clones híbridos (en su mayoría *E. urophylla* x *E. grandis*). Potts y Dungey (2004) mencionan que existen importantes plantaciones con híbridos de eucalipto en China, Indonesia y Sudáfrica. También hay pequeñas áreas en otros países de Asia (Filipinas, Vietnam, Tailandia y Malasia) y Sudamérica (Chile, Uruguay, Argentina y Paraguay).

En Argentina los primeros antecedentes experimentales de híbridos interespecíficos fueron reportados por Alliani (1990). En la Mesopotamia Argentina los primeros cruzamientos controlados para la selección de clones híbridos de *E. grandis* con *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. dunnii* y *E. globulus* fueron generados por Harrand y Schenone (2002). Más recientemente Marcó y Harrand (2012) informaron que el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) posee alrededor de 130 clones híbridos en diferentes etapas de evaluación. Seis de los mismos (3 de *E. grandis* x *E. camaldulensis* y 3 de *E. grandis* x *E. tereticornis*) ya fueron inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares del INASE y desde 2014 están siendo transferidos a los viveros de la región a través de Convenios de Transferencia. Así mismo, en el sector privado, el CIEF y la Empresa Pomera Maderas disponen de clones híbridos para cubrir los requerimientos de sus programas de plantaciones como así también de terceros (*E. grandis* x *E. camaldulensis*, *E. grandis* x *E. tereticornis* y *E. grandis* x *E. urophylla*).

En general, los resultados disponibles en la región mesopotámica muestran que los clones híbridos de *E. grandis* x *E. tereticornis* y de *E. grandis* x *E. camaldulensis* tienen crecimientos similares o superiores a *E. grandis*, con valores de forma y sanidad inferiores (Raute *et al.*, 2005; Marcó y Harrand, 2005 y 2012). No obstante, en cuanto a propiedades de la madera la información es muy limitada ya que se refiere a un único clon de *E. grandis* x *E. tereticornis* (López *et al.*, 2007; Sanchez Acosta, 2012) no existiendo antecedentes en la literatura local respecto al grado de determinación genético de caracteres de crecimiento o de propiedades ligadas a la calidad de la madera para usos de alto valor a efectos de predecir y contrastar genéticamente su aptitud.

La estimación de los parámetros genéticos y la predicción de los valores de mejora de los materiales a seleccionar tienen una importancia central para la definición de las estrategias de mejoramiento sexual y selección clonal (Resende, 2002; White *et al.*, 2007). En este sentido, a partir de la década del 90 con la progresiva utilización de los modelos mixtos de árboles individuales, donde se estiman los parámetros genéticos utilizando el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML) y se predicen los valores de mejora a través de un modelo BLUP (Mejor Predicción Lineal Insegada), los Programas de Mejoramiento Genético Forestal dieron un gran salto cualitativo en relación a las metodologías analíticas de selección genética. Estas permiten jerarquizar a todos los genotipos evaluados estrictamente por su mérito genético libre de efectos ambientales (Borralho, 1995; Resende, 2002; White *et al.*, 2007).

Los valores genéticos (efectos genéticos aditivos) o genotípicos (efectos aditivos y no aditivos) son variables aleatorias no observables que deben ser predichas a partir de los valores

fenotípicos observados (mediciones cuantitativas o cualitativas realizadas en experimentos de campo o laboratorio). Según Resende (2004) considerar a los efectos de tratamientos (familias o clones) como aleatorios es esencial para el mejoramiento genético y es la única manera de hacer selección genética. Caso contrario la selección es fenotípica, abordaje éste ampliamente discutido por varios autores (Borrallho, 1995; Duarte y Vencovsky, 2001; Piepho *et al.*, 2008). Así mismo, al asumir que los efectos genéticos son aleatorios, las pruebas de comparaciones múltiples (Tukey, Scheffé, Duncan o similares) no son aplicables para establecer diferencias genéticas, ya que dichos métodos son derivados de la suposición de efectos fijos de tratamientos y no de variables aleatorias, con lo cual las inferencias obtenidas se refieren a medias fenotípicas y no a medias genéticas o genotípicas (Resende, 2002; White *et al.*, 2007).

Con la aplicación de los modelos mixtos la herramienta clasificatoria para familias, clones o individuos en los ensayos genéticos es el ordenamiento jerárquico basado en la predicción puntual de los valores genéticos o genotípicos predichos generados por el BLUP (Duarte y Vencovsky, 2001). No obstante, Resende (2002) sugiere, en términos de inferencia estadística paramétrica, la conveniencia de complementar la predicción puntual con la predicción de los intervalos de confianza de los valores genéticos predichos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar un grupo de clones híbridos generados por la EEA Concordia dentro del Programa de Mejoramiento Genético de *Eucalyptus* del INTA a efectos de estimar parámetros genéticos y superioridad/inferioridad esperada respecto a algunos materiales comerciales de *E. grandis* utilizados en la Mesopotamia Argentina.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Material genético

El material evaluado forma parte de un ensayo originalmente constituido por 32 clones híbridos, 4 clones puros de *E. grandis* y 4 testigos de semilla. La generación de las progenies híbridas (F1) y la posterior selección de los individuos que dieron origen a dichos clones fue descrita por Harrant y Schenone (2002) y Harrant (2005). El grupo de clones híbridos seleccionados para este estudio fueron elegidos por características de crecimiento, rectitud del fuste y sus antecedentes de mayor tolerancia al frío. En total (Tabla 1) se muestrearon 11 clones de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC), 5 clones de *E. grandis* x *E. tereticornis* (GT), 1 clon de *E. grandis* x *E. dunnii* (GD), 2 clones puros de *E. grandis* (EG) y un material de semilla mejorada (HSP). Los clones 5-108 (GC) y 5-130 (GT) corresponden a selecciones realizadas en 1992 en el marco del Convenio INTA-CIEF en la región pampeana (Marcó y Harrant, 2005).

Tabla 1. Características generales del ensayo original, del sitio y de los materiales evaluados

Ubicación	EEA INTA Concepción del Uruguay, Entre Ríos. (Lat: 32° 29'19" Sur, Long: 58° 21'02" Oeste).
Distancia de plantación	4,0 m x 2,5 m.
Diseño experimental	Bloques al azar con 5 repeticiones.
Unidad experimental	5 plantas en fila.
Suelo	Mestizo en media loma.
Clones de <i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	GC5, GC6, GC7, GC8, GC9, GC10, GC12, C18, GC22, GC27, 5-108.
Clones de <i>E. grandis</i> x <i>E. tereticornis</i>	GT31, GT32, GT37, GT44, 5-130.
Clones de <i>E. grandis</i> x <i>E. dunnii</i>	GD1.
Clones de <i>E. grandis</i>	EG36, EG157.
Testigo de semilla mejorada de <i>E. grandis</i>	HSP: Huerto Semillero de Progenies. Ubajay, Entre Ríos. N° INASE: 6E3066JE.

b. Métodos de muestreo y evaluación

Al 6º año de edad para cada uno de los 20 materiales a estudiar se seleccionaron 5 ejemplares representativos. Para los clones EG36, GD1 y GC9 solo 4 rametos fueron considerados, con lo cual un total de 97 individuos fueron muestreados. En cada uno de ellos se midió diámetro a 1,30 m de altura (DAP) con cinta diamétrica de 1 mm de precisión, altura total (ALT) con un Vertex® III de 10 cm de precisión y se calculó el volumen individual con corteza (VOL_{cc}) utilizando la ecuación propuesta por Glade y Field (1988). Posteriormente, dichos ejemplares fueron abatidos e inmediatamente después del corte se elaboraron en cada uno de ellos, a partir de 1,30 m de altura, 2 rollizos consecutivos (el primero de 3,2 m y el segundo de 2,5 m de longitud). Siguiendo la metodología propuesta por López *et al.* (2009) se estimaron las tensiones de crecimiento a través del índice de Rajado en rollizos (IR_r), proporción de corteza (CORT) y se obtuvieron las probetas para medir densidad básica (DB), contracción radial (Cr), contracción tangencial (Ct), coeficiente de anisotropía (CA) y color del duramen a través de los parámetros colorimétricos L^* , a^* y b^* del Sistema CIELab76.

c. Análisis genético

La información fue analizada utilizando la metodología de modelos mixtos (modelo lineal mixto univariado) utilizando el programa SELEGEN-REML/BLUP (Versión 2014). De acuerdo al muestreo realizado se asumió un diseño experimental totalmente al azar con parcelas de una sola planta (repeticiones) adoptando el siguiente modelo estadístico: $y = Xu + Zg + e$, donde y es el vector de las observaciones, u es el escalar relacionado con la media general (asumidos como fijos), g es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios) y e es el vector de los residuos (asumidos como aleatorios). X y Z corresponden a las respectivas matrices de incidencia. Así mismo, de manera complementaria para el VOL_{cc} se analizaron los mismos materiales motivo de este estudio, ocupando la información del ensayo medido a la misma edad en la que se realizó el muestreo, utilizando un modelo estadístico de bloques al azar con 5 repeticiones y promedios de parcela. Siguiendo los modelos descritos y considerando en primera instancia solo a los 17 clones híbridos y en un segundo análisis incluyendo a los dos clones puros de *E. grandis* (19 clones híbridos y puros) para cada propiedad evaluada se estimó la heredabilidad clonal: $H^2 = \sigma^2_c / (\sigma^2_c + \sigma^2_e)$, donde H^2 es la heredabilidad de parcelas individuales en sentido amplio, o sea, de los efectos genotípicos totales, σ^2_c es la varianza genotípica o clonal y σ^2_e es la varianza residual.

La significancia de la inclusión de los efectos aleatorios (clones) fue estimada a través del análisis de la desviación (*deviance*) y la Prueba de Razón de Verosimilitud (LRT: *likelihood ratio test*) confrontando con el valor de Chi cuadrado (χ^2) con 1 grado de libertad. Para estimar la exactitud de la predicción de los valores genotípicos (*accuracy*) se utilizó el estadístico $r\hat{g}g = (1 - PEV / \sigma^2_c)^{1/2}$; donde PEV es la variancia del error de predicción y σ^2_c es la variancia genotípica o clonal.

Con el fin de obtener un *ranking* que permita visualizar la superioridad/inferioridad genética de los clones respecto al material mejorado de semilla comercial, en un tercer análisis, además de los 19 clones puros e híbridos se incluyó al testigo HSP. Sumado a ello y tal lo sugerido por Resende (2002) a efectos de predecir las diferencias genéticas entre los materiales estudiados, se calculó el límite superior e inferior de los intervalos de confianza (LSIC y LIIC) de los valores genotípicos predichos (VG) por medio de la siguiente expresión: $VG \pm t \cdot SEP$, donde t es el valor de la distribución de t de Student al 95% de confianza y SEP es el desvío estándar del VG.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1.a se puede observar que la correlación simple entre las medias fenotípicas del VOLcc de los ejemplares recolectados para esta investigación y el promedio correspondiente al ensayo medido a la misma edad, resultó altamente significativa ($p < 0,01$) evidenciando una buena representatividad volumétrica de los materiales muestreados ($r = 0,91$). En la Figura 1.b se presentan los valores genotípicos predichos (VG) del volumen individual del ensayo y los intervalos de confianza de la predicción genotípica. Allí se destaca que 9 clones híbridos tuvieron una media genotípica (VG) inferior al testigo de semilla mejorada (HSP) y 8 un VG superior entre 2,4 % (GC9) y 18,9 % (GC18) respecto del testigo HSP (Tabla 2). Sin embargo, teniendo en cuenta el solapamiento de los intervalos de confianza, dicha inferioridad/superioridad genética no pudo ser comprobada con un 95 % de confianza (Figura 1.b). Los únicos materiales genéticamente diferentes y con un volumen inferior al testigo de semilla mejorada (HSP) fueron los clones 5-108 (GC) y 5-130 (GT) dado que el LSIC de ambos clones fueron inferiores al LIIC del testigo HSP (Figura 1.b). Estos clones híbridos fueron seleccionados en la década del 90 a través del Convenio INTA-CIEF en un ensayo con semillas híbridas (F1) procedentes de Sudáfrica (Marcó y Harrand, 2005) y su inclusión en el presente análisis prácticamente fue en carácter de referencia. La no diferenciación genética en VOLcc de los demás clones híbridos respecto a los 2 clones de *E. grandis* al material procedente del Huerto Semillero de Progenies (HSP) es alentadora ya que, esta última fuente semillera se destaca por su alta productividad en la Mesopotamia Argentina. Sumado a ello, el resultado obtenido permite inferir que es posible esperar nuevos clones híbridos con rendimientos superiores a los aquí evaluados al utilizar parentales de *E. camaldulensis* y *E. tereticornis* seleccionados genéticamente en orígenes de mayor adaptación a la región mesopotámica.

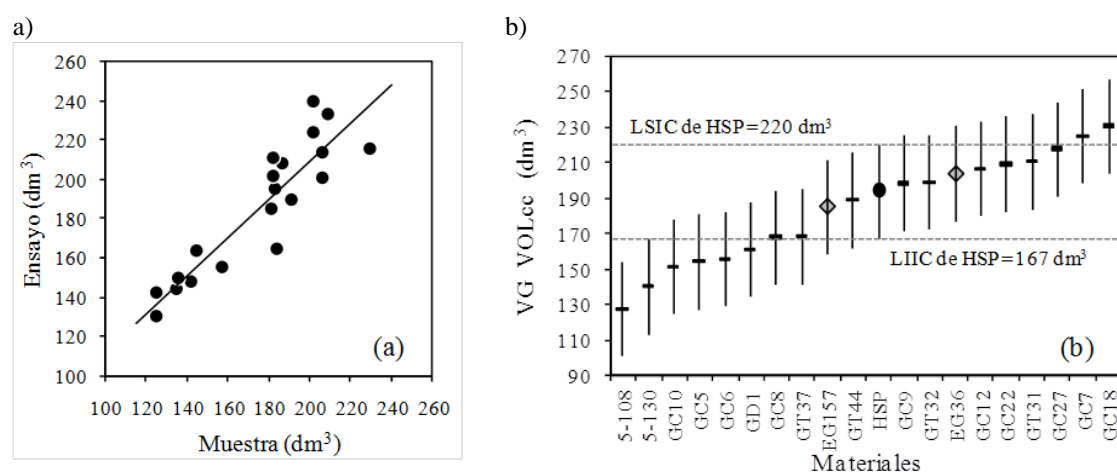


Figura 1. a) Relación del VOLcc de los materiales muestreados y la evaluación realizada en el ensayo. **b)** Valores Genotípicos (VG) y límites superior e inferior de los intervalos de confianza (LSIC, LIIC) generados a partir del análisis del ensayo. La línea de puntos indica el LSIC y LIIC del testigo de semilla mejorada. (●) HSP, ◇ clones de *E. grandis*, — clones híbridos).

En la Tabla 2 se detallan las medias genotípicas de las propiedades evaluadas en todos los materiales estudiados. En la misma se puede ver que al analizar solo a los 17 clones híbridos la Prueba de Razón de Verosimilitud (LRT) cotejada con el test de Chi cuadrado, detectó diferencias altamente significativas para los efectos genotípicos. Así también, con valores absolutos en general mayores de LRT, al incluir en el análisis a los 2 clones puros de *E. grandis*. En cuanto a la exactitud selectiva (r_{gg}) la misma varió entre 0,89 y 0,96 evidenciando alta precisión en las inferencias de las medias genotípicas. Este parámetro según Henderson, 1984

(citado por Resende y Duarte, 2007) es de gran importancia en el contexto de la evaluación genética ya que se refiere a la correlación entre el valor genotípico verdadero y el estimado o predicho a partir de la información proporcionada por el experimento.

En ambos análisis las estimaciones para la H^2 del VOLcc resultaron moderadas y levemente inferiores a las obtenidas para las demás características evaluadas, pero similares a las encontradas en otros estudios involucrando clones puros de *Eucalyptus grandis* (Lambeth *et al.*, 1994; López, 2012) como también, clones puros e híbridos de otras especies del género (Gaspar y Borralho, 2004; Varghese *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2011).

La H^2 de la proporción de corteza (CORT) al considerar solo a los clones híbridos fue de 0,69 y al incluir a los 2 clones puros de *E. grandis* fue de 0,81 evidenciando que dicha inclusión incrementó la varianza genotípica producto del menor porcentaje de corteza de *E. grandis* (Tabla 2). No obstante, dichos coeficientes fueron concordantes con la literatura disponible. En relación a ello, Harrand *et al.* (2009) al evaluar el porcentaje de corteza en familias de polinización libre de *E. grandis* reportaron heredabilidades individuales en sentido estricto (h^2) entre 0,19 y 0,31 resultando éstas superiores a las h^2 correspondientes a los caracteres de crecimiento (DAP, ALT y VOLcc). Por su parte Wei y Borralho (1997) en progenies de *E. urophylla* detectaron que la h^2 del espesor de corteza y la proporción de corteza fue de 0,45 y 0,40 respectivamente. Considerando clones híbridos de *E. urophylla* con *E. grandis*, *E. tereticornis* y *E. camaldulensis* e híbridos de *E. grandis* con *E. urophylla* y *E. tereticornis* Wu *et al.* (2011) indicaron que la H^2 de la media clonal fluctuó entre 0,77 y 0,88 al 4º año de edad.

Tal como se consigna en la Tabla 2 la proporción de corteza (CORT) de los clones híbridos evidenció medias genotípicas superiores al testigo HSP entre 3,4 % (GC22: 12,1) y 38,5 % (GT44: 16,2) siendo éste un aspecto negativo en cualquier proceso industrial. Sólo los clones híbridos GC22, 5-130, 5-108 y GD1 no se diferenciaron genéticamente con un 95 % de confianza (Figura 2.a). Es evidente que las especies parentales tuvieron un importante efecto en esta característica. En este sentido, Salvioni *et al.* (2003) determinaron que el porcentaje de corteza para *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. camaldulensis* y *E. tereticornis* varió entre 10,9-12,3 %, 13,6-17,4 %, 18,6-19,5 % y 18,0-21,2 % respectivamente.

La H^2 del IRr y de la DB varió entre 0,71-0,73 y 0,67-0,87 respectivamente, siendo éstas coherentes con las reportadas en otras investigaciones que demuestran que ambas propiedades son altamente heredables y factibles de mejorarlas aplicando estrategias convencionales de mejoramiento genético. (Pádua *et al.*, 2004; Varghese *et al.*, 2008; Blackburn *et al.*, 2011; López, 2012; López *et al.*, 2012).

Siguiendo las clases de severidad del IRr sugeridas por López *et al.* (2009) para *E. grandis*, se observó que los clones híbridos tuvieron medias genotípicas (VG) de IRr entre Muy Bajas a Medias (Tabla 2). Genéticamente se diferenciaron del testigo HSP por su bajo IRr el clon 5-108 y por su mayor IRr los clones GC6 y GC27 (Figura 2.b). Si bien las evaluaciones fueron realizadas al 6º año de edad es esperable que el comportamiento relativo de los materiales evaluados se mantenga en el tiempo. En este sentido López y López (2013) en clones de *E. grandis* reportaron un alto coeficiente de repetibilidad edad-edad ($r = 0,82$) al evaluar el IRr de los mismos clones al 6º y 11º año de edad, verificando alta consistencia en la posición relativa de los genotipos a través de las dos edades de evaluación. No obstante, si bien en clara dependencia de cada genotipo en particular, también comprobaron un incremento promedio entre ambas edades de evaluación del 64% con lo cual, clones con IRr Medio podrían pasar a la clase de IRr Alto, cuestión ésta que advierte sobre a la fuerte presión de selección que debería ejercerse a edades juveniles para minimizar su efecto al turno de cosecha y disminuir el impacto negativo en la producción de madera aserrada.

Tabla 2. Media genotípica (VG) de los materiales evaluados. Prueba de Razón de Verosimilitud (LRT), heredabilidad clonal (H^2) y exactitud selectiva (r_{gg}) de las propiedades analizadas

Materiales	VOLcc ^(a) (dm ³)	CORT (%)	IRr (%)	DB (kg/m ³)	Cr (%)	Ct (%)	CA	L*	a*	b*
GC18	230,3	15,9	0,423	495,5	9,7	14,8	1,55	74,8	12,7	18,7
GC7	224,6	15,4	0,213	508,0	9,3	17,6	1,90	75,5	11,1	17,9
GC27	217,4	13,7	0,554	531,3	7,6	15,0	1,96	76,4	10,8	17,9
GC22	208,9	12,1	0,301	453,6	7,0	14,2	2,02	76,2	10,3	17,8
GC12	206,3	14,4	0,354	496,0	8,0	16,5	2,04	74,0	10,9	17,4
GC9	198,2	15,6	0,380	503,6	8,2	15,8	1,93	73,8	12,0	17,8
GC8	167,6	15,5	0,322	524,1	8,8	15,3	1,77	76,7	12,4	16,0
GC6	155,6	15,2	0,517	542,5	9,5	17,8	1,89	73,9	11,9	17,2
GC5	154,3	15,4	0,329	510,2	9,5	18,5	1,96	74,6	11,4	18,7
GC10	151,3	14,9	0,360	476,9	8,0	15,9	1,98	75,7	10,3	16,4
5-108	127,6	13,4	0,172	470,9	7,9	14,6	1,87	73,7	12,7	20,2
GT31	210,4	14,7	0,216	521,1	6,5	14,4	2,20	72,7	13,8	19,0
GT32	198,8	14,4	0,207	495,8	10,1	15,6	1,57	72,9	14,5	19,1
GT44	188,9	16,2	0,201	512,4	6,5	12,9	2,00	76,4	11,1	18,3
GT37	168,2	15,9	0,232	519,6	7,7	15,1	1,95	72,1	13,8	18,9
5-130	139,9	13,0	0,505	549,1	7,7	13,8	1,81	74,7	12,8	18,0
GD1	160,9	13,7	0,255	465,7	6,6	10,9	1,70	79,0	11,1	15,4
EG36	204,1	11,6	0,427	433,3	6,7	13,5	2,01	76,2	9,8	19,5
EG157	184,9	11,0	0,353	349,4	4,8	9,8	2,09	76,4	10,3	17,1
HSP	193,6	11,7	0,341	429,6	6,5	11,8	1,83	75,0	11,4	17,9
LRT ⁽¹⁾	31,2**	54,3**	62,9**	49,0**	53,8**	71,7**	46,8**	73,0**	41,6**	40,5**
r_{gg} ⁽¹⁾	0,89	0,93	0,93	0,92	0,93	0,94	0,92	0,94	0,91	0,91
H^2 ⁽¹⁾	0,54	0,69	0,73	0,67	0,69	0,78	0,65	0,78	0,61	0,62
LRT ⁽²⁾	31,3**	92,3**	64,4**	121,3**	83,0**	103,0**	50,6**	81,2**	52,9**	40,3**
r_{gg} ⁽²⁾	0,89	0,95	0,93	0,96	0,94	0,95	0,92	0,95	0,92	0,91
H^2 ⁽²⁾	0,51	0,81	0,71	0,87	0,78	0,84	0,64	0,78	0,66	0,59

^(a) corresponde a las evaluaciones realizadas en el ensayo, ⁽¹⁾ solo clones híbridos, ⁽²⁾ clones puros e híbridos, ** significativo al 0,01% por el test de Chi cuadrado.

En relación a la densidad básica de la madera (DB) y debido a las características intrínsecas de las especies utilizadas como padres, todos los clones híbridos exhibieron valores genotípicos (VG) superiores a los 2 clones de *E. grandis* y al testigo de HSP (Tabla 2) revelando mejor aptitud que *E. grandis* para usos de mayor resistencia mecánica o para bioenergía. Esta superioridad fue desde 5,6 % (GC22: 453,6 Kg/m³) a 27,8 % (5-130: 549,1 Kg/m³), no pudiendo diferenciarse genéticamente de HSP solamente los clones GC22, GD1, 5-108 y GC10 (Figura 2.c). Dado que la DB de la madera adulta, en promedio, es un 25-30 % mayor que la desarrollada a edades jóvenes, debe esperarse que en edades más avanzadas la DB de los materiales aquí evaluados presenten un incremento de similar magnitud (López y Staffieri, 2003; Cardozo et al., 2013; López y López, 2011). Pese a ello, el ranking genético obtenido no debería sufrir alteraciones significativas ya que la literatura muestra que la correlación genética juvenil-adulto de la DB en eucaliptos generalmente es alta (>0,80) (López, 1993; Osorio et al., 2003; Kien et al., 2008).

En cuanto a la H^2 de las contracciones radiales (Cr) y tangenciales (Ct) al considerar solo a los clones híbridos fue de 0,69 y 0,78 respectivamente (Tabla 2). Al incluir a los 2 clones puros de *E. grandis* dichos coeficientes fueron mayores (H^2 Cr = 0,78 y H^2 Ct = 0,84). Estas estimaciones coinciden con Botrel et al. (2007) quienes al evaluar clones de *E. tereticornis* x *E. pellita* y *E. camaldulensis* x *E. grandis* obtuvieron una H^2 de 0,79 para la Cr y de 0,80 para la Ct. Por su parte, Rodríguez et al. (2008) en clones de *Eucalyptus* ssp. también detectaron altas H^2 para las Cr, Ct y CA aunque esta última propiedad tuvo una H^2 entre 20 y 23 % menor. En este sentido, tal como se consigna en la Tabla 2, el CA en ambos análisis también evidenció heredabilidades menores a la de las contracciones lineales primarias. No obstante, una H^2 de

0,64-0,65 indica que este estimador de la estabilidad dimensional manifiesta un moderado control genético.

A excepción del clon híbrido de *E. grandis* x *E. dunnii* (GD1) y los clones GT31 y GT44, cuyos VG fueron similares al testigo HSP, los demás clones híbridos exhibieron contracciones radiales y tangenciales de mayor magnitud (Tabla 2). Cabe aquí mencionar que las medias genotípicas y los límites superior e inferior de los intervalos de confianza del testigo de *E. grandis* (Figura 2.d y e) son coincidentes con los promedios reportados por Calvo *et al.* (2007) para muestras de plantaciones ubicadas en el Noreste de Entre Ríos y Corrientes. Dichos autores informaron que la *Cr* osciló entre 4,45 y 7,10 % y la *Ct* entre 9,76 y 11,54 %.

En la Figura 2.d puede visualizarse que, en cuanto a las *Cr*, 6 clones híbridos (GC8, GC7, GC6, GC5, GC18 y GT32) se diferenciaron genéticamente del testigo de semilla mejorada (HSP). Por su parte, 13 de los 17 clones híbridos y con un 95% de confianza (Figura 2.e) evidenciaron *Ct* genéticamente mayores al material de *E. grandis* utilizado como testigo (HSP). Contracciones radiales y tangenciales de hasta un 37 % superiores a las de *E. grandis* fueron reportadas por Malan (1993) al evaluar clones híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* y *E. grandis* x *E. tereticornis* al 5º año de edad en diferentes sitios de Sudáfrica.

Considerando los valores genotípicos (VG) del coeficiente de anisotropía (CA) la mayoría de los clones híbridos y según la clasificación de Coronel (1994) se ubicaron en la categoría de estabilidad dimensional normal (Tabla 2). La estimación puntual para el CA del testigo de semilla (HSP) fue de 1,83 siendo éste comparable al valor más bajo obtenido por Calvo *et al.* (2007) quienes señalan para *E. grandis* coeficientes de anisotropía entre 1,86 y 2,25. Algunos clones híbridos (GC8, GD1, GT32 y GC18) a pesar de los altos valores de contractibilidad evidenciaron buena estabilidad dimensional con CA entre 3,4 % (GC8: 1,77) y 18,1 % (GC18: 1,55) inferiores al testigo HSP. Otros materiales como los clones híbridos GT31, GC12 y GC22 presentaron CA que califican a su madera como de menor aptitud para varios usos (Coronel, 1994). Estas maderas “nerviosas” o de grandes movimientos y alta densidad, como algunos de los clones híbridos evaluados, según Cardozo *et al.* (2013) son posibles de utilizarlas en pisos de alto tránsito, mobiliarios de exterior y cubiertas, productos éstos en los que la anisotropía puede ser tratada por diseño. De todas maneras los intervalos de confianza de la predicción genotípica (Figura 2.f) solo permite asegurar que los clones híbridos GT31 y GC18 tuvieron un CA genéticamente diferente al testigo de semilla mejorada de *E. grandis*.

Respecto al color del duramen, la H^2 de los parámetros colorimétricos L^* , a^* y b^* y considerando solo a los clones híbridos fue de 0,78, 0,61 y 0,63 respectivamente (Tabla 2) indicando que entre el 61 y 78 % de la variación fenotípica total no pudo ser explicada por efectos meramente ambientales, siendo dichos porcentajes preponderantemente de origen genético. La inclusión en el análisis de los 2 clones puros de *E. grandis* prácticamente no produjo cambios en la magnitud de la H^2 de los 3 parámetros colorimétricos. Si bien la literatura es escasa respecto al grado de determinación genético del color de la madera, el moderado control genético de esta propiedad es coincidente con lo reportado por Vanclay *et al.* (2008) para *E. dunnii* y Sotelo Montes (2008) para *Calycophyllum spruceanum*. No obstante, desde el punto de vista industrial y considerando usos sólidos de apariencia, al comparar las diferencias del color del duramen de los clones híbridos GC y GT con el testigo de *E. grandis* (HSP) utilizando la metodología estándar del Sistema CIELab ($\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$) los ΔE^* oscilaron entre 0,58 (GC7) y 3,93 (GT32). Al confrontar el único híbrido con *E. dunnii* (GD1) el ΔE^* fue de 4,73. Estos resultados posicionan a los clones híbridos GC y GT, en menor medida al híbrido GD1, en igualdad de condiciones que *E. grandis* para usos de apariencia ya que según Melgosa *et al.* (2001) un observador promedio solo podría distinguir diferencias de color “notables” cuando el ΔE^* es superior a 5 unidades CIELab.

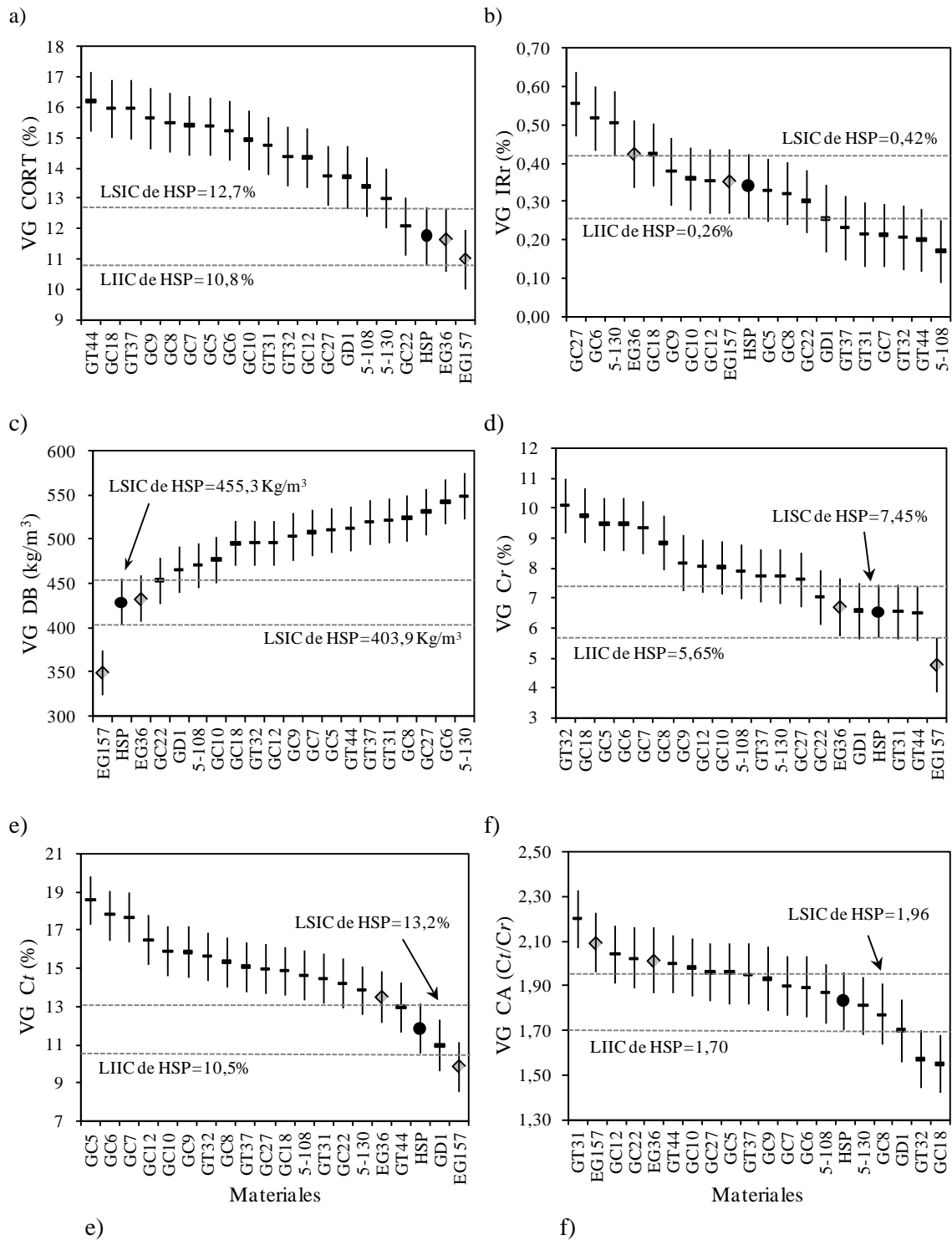


Figura 2. Valores Genotípicos (VG) y límites superior e inferior de los intervalos de confianza (LSIC, LIIC) para proporción de corteza (CORT), índice de rajado en rollizos (IRr); densidad básica (DB), contracción radial (Cr), contracción tangencial (Ct) y coeficiente de anisotropía (CA). La línea de puntos indica el LSIC y LIIC del testigo de semilla mejorada. (: HSP, : clones de *E. grandis*, : clones híbridos).

4. CONCLUSIONES

Para todas las características evaluadas en los clones híbridos se detectaron diferencias altamente significativas para los efectos genotípicos y las heredabilidades en sentido amplio oscilaron entre moderadas a altas (0,54-0,78). La exactitud selectiva (r_{gg}) varió entre 0,89 y 0,96 evidenciando alta precisión en las inferencias de las medias genotípicas.

Al comparar con el material de semilla mejorada de *E. grandis*, la mayoría de los clones híbridos evidenciaron alta velocidad de crecimiento, elevada proporción de corteza, alta densidad de la madera, bajo nivel de tensiones de crecimiento y una estabilidad dimensional aceptable a pesar de los altos valores de contractibilidad radial y tangencial. En cuanto al color del duramen se constató gran similitud con el testigo de *E. grandis* posicionando a éstos híbridos en igualdad de condiciones para usos de apariencia.

Dado que el análisis fue realizado en un único sitio las variancias genotípicas podrían estar sobrestimadas, por lo tanto sería conveniente realizar evaluaciones similares en otros sitios y a edades más adultas a efectos de contar con estimaciones más robustas e identificar clones con mayor adaptabilidad, estabilidad y productividad. Sumado a ello, la generación de nuevos clones híbridos utilizando parentales de *E. camaldulensis* y *E. tereticornis* seleccionados en orígenes de mayor adaptación a la región mesopotámica, no solo permitirá ampliar las fronteras forestales hacia zonas donde *E. grandis* presenta restricciones, sino también incrementar la oferta de otros productos maderables.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alliani, R. C. 1990. Plan de Mejoramiento en la Región Pampeana. Jornada sobre eucaliptos para la Región Pampeana. Actas CIEF, Buenos Aires: 23-28.
- Assis, F. T. and M. D. V. Resende. 2011. Genetic improvement of forest tree species. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* S1: 44-49
- Assis, T. F. e R. G. Mafia. 2007. Hibridação e clonagem. In: Borém, A. (Ed.) *Biotecnologia florestal. Viçosa, MG*: [s.n.], 2007: 93-121.
- Blackburn, D. P.; M. G. Hamilton; C. E. Harwood; T. C. Innes; B. M. Potts and D. Williams. 2011. Genetic variation in traits affecting sawn timber recovery in plantation-grown *Eucalyptus nitens*. *Annals of Forest Science* 68:1187-1195
- Botrel, M. C. G.; J. R. Moreira da Silva; P. F. Trugilho; S. C. S. Rosado; B. R. Fernandes. 2007. Ganho genético em propriedades físicas e mecánicas de clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis, Piracicaba*, n. 76: 13-19.
- Borrvalho, N. M. G. 1995. The impact of Individual tree mixed models (BLUP) in tree breeding strategies. Potts *et al.* (Eds.). IUFRO, Symposium on Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia: 141-145.
- Calvo, C. F.; A. D. Cotrina; A. G. Cuffre; M. Ott; J. C. Piter; P. M. Stefani; E. A. Torran; A. Vivian. 2007. Propiedades de inchamiento y contracción de la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*, n.20, ano 8. ISSN 1806-6097.
- Cardozo, A.; M. Cagno; P. Cárdenas y F. Gatto. 2013. Contracción, hinchamiento y peso específico aparente de madera de eucalipto colorado. (*Eucalyptus tereticornis* Smith). *Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay*. ISSN 1688-3691-5: 5-12
- Coronel, E. O. 1994. *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. ITM. Facultad de Ciencias Forestales. UNSE. Ed. El Liberal. ISBN: 950-43-6061-0. 187 p.
- Duarte, J. B. e R. Vencovsky. 2001. Estimación e predição por modelo linear misto com ênfase na ordenação de médias de tratamentos genéticos. *Scientia Agricola* 58 (1): 109-117

- Glade, J. E. y R. A. Field. 1988. Ecuaciones de volumen para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en el Noreste de Entre Ríos. VI Congreso Ftal. Arg. Sgo. del Estero. Tomo II: 416-420
- Gaspar, M. J. and N. Borralho. 2004. Comparing estimates of heritability base don clones, parent offspring and open pollinated progenies of *E. globulus*. 2004. *Eucalyptus in a Changing World*. N.M.G. Borralho et al. (Eds.). Proc. IUFRO Conf., Aveiro, Portugal: 173-174.
- Harrand, L. 2005. La utilización de híbridos interespecíficos como alternativa forestal. En: *IDIA XXI*. Año V. N°8: 171-174
- Harrand, L. y R. Schenone. 2002. Obtención de individuos híbridos de *Eucalyptus* a través de la realización de cruzamientos controlados. XVII Jdas. Ftale. de E. Ríos. Actas [CD]10 p.
- Harrand, L.; J. J. Vargas Hernández; J. López Upton and G. Ramirez Valverde. 2009. Genetic parameters of growth traits and Wood density in *Eucalyptus grandis* progenies planted in Argentina. *Silvae Genetica* 58, 1-2:11-19
- Harwood, C. 2011. New introductions-Doing it right. In: *Developing a Eucalypt Resource: Learning from Australia and elsewhere. Wood Tech. Research Centre. Workshop Proc.*: 43-54
- Kien, N. D.; G. Jansson; C. Harwood; C. Almqvist; H. H. Thinh. 2008. Genetic variation in wood basic density and pilodyn penetration and their relationships with growth, stem straightness, and branch size for *Eucalyptus urophylla* in Northern Vietnam. *New Zealand Journal of Forestry Science* 38(1): 160-175
- Lambeth, C.; E. Masatoshi and J. Wright. 1994. Genetic analysis of 16 clonal trial of *Eucalyptus grandis* and comparisons with seedling checks. *Forest Science*. Vol. 40: 397-411
- López (h.), J. A. 2012. Selección genética de clones de *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN en el Sudeste de Corrientes utilizando la metodología REML-BLUP. 15° Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF-INTA. Eldorado, Misiones Argentina. 11 p. Actas en CD.
- López (h.), J. A. 1993. Variación, heredabilidad y correlaciones genéticas de la densidad de la madera de 15 familias de *Eucalyptus grandis*. Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Paraná (E. Ríos). Actas. Comisión IV. 5 p.
- López (h.), J. A. y G.M. Staffieri. 2003. Variación radial de la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii* a los 21 años de edad. XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina. 8 p. Actas en CD.
- López (h.), J. A.; P. Y. Genes; M. A. Marcó y J. Oberschelp. 2007. Propiedades de la madera del híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus tereticornis* en el Centro y Norte de la Provincia de Entre Ríos. III Congreso Iberoamericano de Prod. Ftale. Bs. As. Argentina: 10 p.
- López (h.), J. A.; P. Y. Genes; M. Hernández; M. A. Marcó; L. Harrand y J. Oberschelp. 2009. Propiedades físicas, mecánicas y organolépticas de 10 clones de *Eucalyptus grandis* de 1ª generación del Programa de Mejoramiento Genético del INTA. EEA INTA Bella Vista, Corrientes. 26 p. Disponible en: <http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-propiedades_fisicas_mecanicas_y_organoleptic.pdf>
- López, A. J. y J. A. López. 2011. *Eucalyptus grandis* en el Sudeste de Corrientes: variación de la densidad de la madera. XXI Jornadas Ftale. de Entre Ríos. Concordia, Argentina: 6 p.
- López (h.), J. A.; N. Borralho; A. J. López; M. A. Marcó y L. Harrand. 2012. Variación genética del índice de rajado rollizos en *Eucalyptus dunnii*. Simposio IUFRO. Pucón Chile. 12 p.
- López (h.), J. A. y A. J. López. 2013. Coeficiente de repetibilidad edad-edad de las tensiones de crecimiento en clones de *Eucalyptus grandis*. 4º Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú. Argentina. 13 p.
- Malan, F. S. 1993. The Wood properties and qualities of three South African-Grown *Eucalyptus* hybrids. *South African Journal*, N° 167: 35-44
- Marcó, M. A. y L. Harrand. 2005. Valor potencial de los eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. I Jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Actas en CD. 10 p.

- Marcó, M. A. y L. Harrand. 2012. El Programa de Mejora de Eucaliptos del INTA en la Mesopotamia Argentina. In: López, J. A. et al. (Eds.). Jornadas de actualización técnica. Mejoramiento de pinos y eucaliptos subtropicales. Concordia, Entre Ríos, Argentina. Ediciones INTA. ISBN 978-987-679-144-1: 44-48.
- Melgosa, M.; M.M. Perez; A. Yebra; R. Huertas y E. Hita. 2001. Algunas reflexiones y recientes recomendaciones internacionales sobre evaluación de diferencias de color. *Óptica Pura y Aplicada*. Vol. 34: 1-10
- Osorio, L. F.; T. L. White and D. A. Huber. 2003. Age–age and trait–trait correlations for *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and their implications for optimal selection age and design of clonal trials. *Theor. Appl. Genet.* (2003) 106:735-743
- Pádua, A. F.; P. F. Trugilho; S. S. C. Rosado; J. T. Lima; A. A. Cardozo e C. A. Olivera. 2004. Estimativa de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* 66: 152-160
- Piepho, H. P.; J. Möhring; A. E. Melchinger and A. Büchse. 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica* 161: 209-228.
- Potts, B. M. and E. Dungey. 2004. Interspecific hybridization of *Eucalyptus*: key issues for breeders and geneticists. *New Forests* 27: 115-138
- Raute, G.; G. C. Bunse y J. L. Paul. 2005. Crecimiento a los 2 años de clones de *Eucalyptus* spp. en suelos arenosos del norte de Corrientes. 3^{er} Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina. ISSN 1669-6786. Actas en CD.
- Resende, M. D. V. 2002. *Genética biométrica y estadística no melhoramento de plantas perenes*. Brasilia: Embrapa informação Tecnológica. 2002. ISBN 85-7383-161-8. 975 p.
- Resende, M. D. V. 2004. *Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo*. Documentos Embrapa Florestas, Colombo. ISSN 1679-2599. 56 p.
- Resende, M. D. V. e J. B. Duarte. 2007. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. *Pesq Agropec Trop* 37(3): 182-194
- Rodriguez, E. A. C.; S. C. Silva Rosado; P. F. Trugilho; A. M. Santos. 2008. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. *Cerne, Lavras*. V. 14, n. 2: 147-152
- Salvioni, R.; A. Garau y S. Delfino. 2003. Porcentaje de corteza de cinco especies de eucalipto en forestaciones de Ramallo, Pcia. de Buenos Aires. En: XVIII Jornadas Ftale. de Entre Ríos.
- Sanchez Acosta, M. 2012. *Caracterización de la madera del nuevo híbrido Eucalyptus grandis, Hill ex Maiden x Eucalyptus tereticornis, Smith, su aptitud de usos en Argentina*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. Ingeniería de Montes. 125 p. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/1708/1/TESIS211_121025.pdf>
- SELEGEN-REML/BLUP. 2014. *Sistema Estatístico e Selecao Genética Computadorizada*. Embrapa-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. INPI Nº 00052763. Disponible en: <http://www.det.ufv.br/ppestbio/corpo_docente.php>
- Sotelo Montes, C.; R. E. Hernández; J. Beaulieu and J. Weber. 2008. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *New Forests*. 35:57-73
- Vanclay, J. K.; M. Henson and G. Palmer. 2008. Color variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood. *The Japan Wood Research Society*. 54:431-435.
- Varghese, M.; C. E. Harwood; R. Hegde and N. Ravi. 2008. Evaluation of provenances of *Eucalyptus camaldulensis* and clones of *E. camaldulensis* and *E. tereticornis* at contrasting sites in southern India. *Silvae Genetica* 57, 3: 171-179
- White, T. L.; W. T. Adams and D. B. Neale. 2007. *Forest genetics*. CABI Publishing. ISBN 9780851993485. 704 p.

- Wei, X. and N. M. G. Borralho. 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: 245-250
- Wu, S.; J. Xu; G. Li; V. Risto; Z. Du; Z. Lu; B. Li; W. Wang. 2011. Genotypic variation in wood properties and growth traits of *Eucalyptus* hybrid clones in southern China. *New Forests* 42:35-50

