

Seleção genética em teste de progênes de irmãos completos
de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetalGenetic selection in *Eucalyptus* full-sibs
families for charcoal productionEduardo Pinheiro Henriques¹, Andrei Caique Pires Nunes², Mário Luiz Teixeira de Moraes³,
Marcos Deon Vilela de Resende⁴, Alexandre Magno Sebbenn⁵ e Marcela Aparecida de Moraes⁶**Resumo**

O objetivo deste estudo foi avaliar um teste de progênes de irmãos completos de *Eucalyptus* aos 2, 5 e 7 anos de idade para selecionar genitores e indivíduos superiores em um programa de seleção recorrente recíproca no estado de Minas Gerais. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com 286 famílias de irmãos completos, oito repetições e parcelas lineares de seis plantas. Os caracteres avaliados foram a altura (ALT), diâmetro a altura do peito (DAP) e volume (VOL). A herdabilidade individual no sentido restrito (h_a^2) para VOL para todas as idades foi de aproximadamente o dobro da herdabilidade dos efeitos de dominância da população (h_{dom}^2). A herdabilidade individual no sentido amplo (H_a^2) para o VOL foi média (variou entre idades de 0,28 a 0,39), o que indica a possibilidade de ganhos genéticos com a seleção dentro da população. Foram selecionados 256 indivíduos de 32 famílias de maior VOL (média de 74,24 m³.ha⁻¹.ano⁻¹) para formação do pomar de recombinação e 65 indivíduos para estabelecimento do pomar de hibridação. Foram também selecionados os dez indivíduos com maior VOL para clonagem (média de 86,08 m³.ha⁻¹.ano⁻¹). A metodologia de seleção genética utilizada possibilitou o estudo quantitativo da população de irmãos completos e direcionamento de cruzamentos futuros para o programa de seleção recorrente recíproca em Minas Gerais.

Palavras-chave: Parâmetros genéticos; Seleção Recorrente Recíproca; Teste de progênes.

Abstract

The objective of this study was to evaluate a progeny test of *Eucalyptus* full-sib families at 2, 5 and 7 years of age to select parents and superior individuals in a reciprocal recurrent selection program in the state of Minas Gerais. The experimental design was a randomized complete block design with 286 full-sib families, eight replications and linear plots of six plants. The evaluated traits were height (ALT), diameter at breast height (DAP) and volume (VOL). The individual heritability in strict sense (h_a^2) for VOL and for all ages was approximately double the heritability of the dominance effects of the population (h_{dom}^2). The individual heritability in the broad sense (H_a^2) for the VOL was medium (ranged between ages from 0.28 to 0.39), which indicates the possibility of genetic gains with selection within the population. A total of 256 individuals were selected from 32 families with a highest VOL (mean of 74.24 m³.ha⁻¹.year⁻¹) to establish a seed orchard and 65 progenies were selected for a hybrid seed orchard. Ten individuals with highest VOL were also selected (mean of 86.08 m³.ha⁻¹.year⁻¹). The genetic selection methodology used allowed the quantitative study of the full-sib population and the direction of future crosses for the reciprocal recurrent selection program in Minas Gerais.

Keywords: Genetic parameters; Progeny test; Reciprocal Recurring Selection.

¹Doutor em Engenharia Florestal. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / FCA – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Caixa Postal 237 – 18610-237 – Botucatu, SP, Brasil. E-mail: eduardopinheirohenriques@gmail.com.

²Professor Adjunto de Melhoramento Florestal e Biotecnologia. UFSB - Universidade Federal do Sul da Bahia. Campus Jorge Amado – Rodovia de Acesso para Itabuna, Km 39 - 45613-204 – Itabuna, BA, Brasil. E-mail: andreicaique@gmail.com.

³Professor Titular do Departamento de Fitotecnia e Tecnologia de Alimentos e Sócio Econômica. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / FEIS- Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Avenida Brasil, n. 56 – Centro – 15385-000 – Ilha Solteira, SP, Brasil. E-mail: teixeira@agr.feis.unesp.br.

⁴Pesquisador Doutor. Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Florestas. Estrada da Ribeira, Km 11 – 83411 -000 – Colombo, PR, Brasil. E-mail: marcos.deon@gmail.com.

⁵Pesquisador Doutor. IF – Instituto Florestal de São Paulo. Estação Experimental de Tupi. Rodovia Luiz de Queiroz, KM 149,5 – Tupi – 13400-970 – Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: alexandresebbenn@yahoo.com.br.

⁶Pós Doutorado em Fisiologia Vegetal. USP – Universidade de São Paulo / FFCLRP – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto. Av. Bandeirantes, 3.900 – Vila Monte Alegre – 14040-900 – Ribeirão Preto, SP, Brasil. E-mail: marcela.apmoraes@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Em 2015 a área ocupada por plantio de *Eucalyptus*, *Pinus* e outras espécies (entre elas Seringueira, Acácia, Teca e Paricá) no Brasil foi de 7.801.047 ha, sendo 5.630.607 ha (72%) de *Eucalyptus*, 1.581.239 ha (20%) de *Pinus* e 589.201 ha (8%) de outras espécies, conforme Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016). Os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Bahia se destacaram no cenário nacional como detentores de 68% da área total dos plantios de *Eucalyptus*.

A partir da metade da década de 1970, Empresas integradas/verticalizadas, (de celulose e siderúrgicas entre as demais) que plantavam florestas para consumo próprio e outras, com o objetivo de formar patrimônio florestal para negociação futura, utilizaram intensivamente de incentivos fiscais para reflorestamentos com espécies exóticas. A falta de dados e de tecnologia florestais forçou o seguimento florestal a utilizar técnicas agrícolas para a implantação dos plantios. A introdução das espécies foi baseada nas recomendações de Golfari (1975), que, por exemplo, indicava para plantios especialmente na região do cerrado de Minas Gerais as espécies: *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. grandis* e *E. saligna*. Florestas nativas de cerrado que nesta região tinham baixa produtividade em termos de volume de madeira ($1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) foram substituídas por espécies do gênero *Eucalyptus* introduzidas, as quais eram mais produtivas ($9,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$). No caso das indústrias siderúrgicas, o carvão vegetal produzido de floresta plantada foi de grande relevância, por diminuir a produção de carvão a partir da floresta nativa, bem como reduziu a importação do coque mineral, que apresentava o agravante de ser altamente poluente. A baixa produtividade levou também as empresas a imobilizarem um grande patrimônio fundiário, o que agravou os conflitos de terra em diversas regiões do país, notadamente nas extensas áreas mais pobres, e sem recursos como o Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais e a iniciarem programas de melhoramento genético sólido para aumentar a produtividade dos plantios de *Eucalyptus*.

Programas de melhoramento genético de espécies de *Eucalyptus* possibilitaram aumento na produtividade dos plantios, pela definição de espécies e procedências mais adaptadas aos ambientes de cultivo, adequação ao produto final, métodos de propagação, hibridação e silvicultura clonal, devido à possibilidade do planejamento dos cruzamentos pela indução floral em genitores enxertados e conduzidos em casa de vegetação. Essas técnicas foram determinantes para o sucesso do programa de melhoramento estabelecer estratégias que tenham como fundamento a condução das hibridações, visando ao melhoramento do próprio híbrido ao longo das gerações com aumento contínuo da heterose. A expectativa é de que os híbridos gerados entre os genitores com base em seus valores genéticos preditos em populações divergentes e, portanto, portadores de boa capacidade geral e específica de combinação apresentem superioridade ao longo das gerações em esquemas de seleção recorrente recíproca (ROCHA et al., 2007).

As estratégias ideais de melhoramento de híbridos de Eucalipto com vistas à clonagem devem basear-se em seleção recorrente recíproca (SSR), conforme sugerido por Resende e Higa (1990). Esse método tem sido usado por várias indústrias de celulose no Brasil, África do Sul e Congo, geralmente envolvendo o híbrido entre as espécies *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Por exemplo, o programa de SRR da V&M Florestal iniciou-se em 1980, com as espécies *Eucalyptus camaldulensis* e *E. urophylla*, com produtividade em termos de volume de madeira de $4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e resultaram na produtividade média de $36 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, o que corresponde a ganhos genéticos de 900% (ASSIS, 1996). Este aumento expressivo nos ganhos de produtividade pode ser atribuído, principalmente à hibridação interespecífica (ASSIS et al., 2007). Esta técnica apresenta a introgressão de genes exógenos de interesse, por polinização controlada ou aberta, de pólen de espécies com as características desejadas (BOUDET, 1998).

Todavia, o êxito do melhoramento genético está associado à capacidade de acerto na escolha dos melhores genitores para serem os pais das próximas gerações melhoradas (CRUZ; CARNEIRO, 2003). Para a identificação dos indivíduos portadores de genes desejáveis é necessária a avaliação genética dos candidatos à seleção. Em plantas perenes como *Eucalyptus*, recomenda-se que a seleção seja feita com base nos valores genéticos aditivos dos indivíduos que serão utilizados na recombinação e nos valores genotípicos dos indivíduos que serão clonados (RESENDE, 2002a). O procedimento adequado para a predição dos valores genéticos utilizados na avaliação de plantas perenes tem sido o REML/BLUP (melhor predição linear não viesada) individual que consiste, basicamente,

na predição de valores genéticos dos efeitos aleatórios do modelo estatístico, associado às observações fenotípicas, ajustando-se os dados aos efeitos fixos e ao número desigual de informações nas parcelas, por meio de metodologia de modelos mistos (HENDERSON et al., 1959).

Nesse contexto, o presente estudo estimou parâmetros genéticos e valores genéticos preditos pela metodologia de REML/BLUP para caracteres de crescimento, em um teste de progênies de irmãos completos aos 2, 5 e 7 anos de idade para selecionar genitores e indivíduos superiores de *Eucalyptus* em um programa de SRR no estado de Minas Gerais, Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O estudo foi realizado em um teste de progênies de híbridos interespecíficos de irmãos completos, com 286 cruzamentos de polinização controlada em um pomar de semente clonal (PSC) de *E. urophylla* S. T. Blake, denominado (PSC 2000), no qual 33 árvores funcionaram como parentais femininos, pertencentes ao acervo de melhoramento genético florestal da Empresa Aperam Bioenergia Ltda. Os parentais masculinos (doadores de pólen) foram 64 árvores selecionadas em bancos clonais, testes clonais e pomares de sementes, com base nos seus rendimentos volumétricos e variabilidade genética de espécies e híbridos (Tabela 1).

Tabela 1. Relação e quantidade (*n*) dos materiais genéticos utilizados para a hibridação inter-específica.
Table 1. List of genetic materials used for inter-specific hybridization.

Feminino (Origem)	<i>n</i>	Masculino (Origem)	<i>n</i>
<i>E. urophylla</i> (Timor)	28	<i>E. grandis</i>	4
<i>E. urophylla</i> (Flores)	5	<i>E. saligna</i>	2
Total	33	<i>E. urophylla</i> (Flores)	2
		<i>E. urophylla</i> (Timor)	1
		<i>E. robusta</i>	1
		<i>E. resinífera</i>	5
		Híbrido espontâneo: <i>E. urophylla</i>	12
		Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	4
		Híbrido <i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)	5
		Híbrido <i>E. urophylla</i> x [<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)]	3
		Híbrido <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	6
		Híbrido <i>E. resinífera</i> x <i>E. grandis</i>	7
		Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>	1
		Híbrido <i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>	2
		Híbrido <i>E. pellita</i> x (<i>E. grandis</i> x <i>E. tereticornis</i>)	1
		Híbrido <i>E. robusta</i> x <i>E. urophylla</i>	1
		Híbrido <i>E. robusta</i> x <i>E. grandis</i>	2
		Híbrido <i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>	4
		Híbrido <i>E. saligna</i> x <i>E. grandis</i>	1
		Total	64

O experimento foi implantado em novembro de 2003, no município de Itamarandiba no Estado de Minas Gerais (17° 44' 45" S, 42° 45' 11" W e altitude 1.000 m). A condição de clima e solo da região, onde se encontra o teste de híbridos, é de precipitação pluviométrica média anual de 1166 mm, temperatura média de 21° C e o clima, conforme classificação de Köppen é tropical de altitude, temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa). O solo é um latossolo vermelho distrófico típico e vermelho amarelo distrófico típico, com textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturada. A topografia é plana (chapada) e a vegetação nativa é de Cerrado.

Delineamento experimental e coleta de dados

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com oito repetições em parcelas lineares de seis plantas, para 286 tratamentos (cruzamentos) ou famílias. O espaçamento de plantio foi de 3 m entre linhas e de 2 m entre plantas na linha de plantio, perfazendo uma área contígua de 10 ha. Foram efetuadas medições nas árvores do experimento aos 2, 5 e 7 anos de idade das plantas, sendo a última na idade em que se faz a colheita da madeira para fabricação de carvão

vegetal. Os caracteres medidos foram: Altura (ALT, m), utilizando-se clinômetro Suunto PM-5 360 PC; Diâmetro à altura do peito (DAP, cm), utilizando-se fita métrica; sobrevivência (porcentagem). O volume individual das árvores foi calculado por, $VOL = (\pi d^2 / 4) h 0,5$, em que d é o DAP, h é a ALT e 0,5 valor aplicado para fator de forma da árvore. O volume por hectare foi calculado por, $VOL = (\pi d^2 / 4) h 0,5 * 1391$, em que 1391 é o número de árvores sobreviventes por hectare no espaçamento de plantio 3 x 2 m.

Análise estatística dos dados

Estimativas de componentes de variâncias, parâmetros genéticos para caracteres de crescimento e a seleção individual ao nível de plantas foram obtidas pelo método de máxima verossimilhança restrita e melhor predição linear não viciada (REML/BLUP), empregando-se o software SELEGEN-REM/BLUP e o Modelo 88 deste software (RESENDE 2016). O modelo estatístico utilizado pode ser dado por:

$$Y = Xr + Zm + Wf + Tc + Sp + e$$

em que: y é o vetor de dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral; m é o vetor dos efeitos de genitores da população de machos (assumidos como aleatórios); f é o vetor dos efeitos de genitores da população de fêmeas (assumidos como aleatórios); c é o vetor dos efeitos da capacidade específica de combinação dos genitores da população de machos com os genitores da população de fêmeas (aleatórios); p : é o vetor dos efeitos de parcela (aleatórios); e : é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios). As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos. As variáveis quantitativas e os parâmetros genéticos foram analisados conforme as equações abaixo admitindo que as progênes de polinização controlada sejam irmãos completos:

σ_{gm}^2 : estimativa da variância genética entre machos ou genitores da população 1 em cruzamento com a população 2, a qual estima (1/4) da variação genética aditiva correspondente;

σ_{gf}^2 : estimativa da variância genética entre fêmeas ou genitores da população 2 em cruzamento com a população 1, a qual estima (1/4) da variação genética aditiva correspondente;

$\sigma_a^2 = 2(\sigma_{gm}^2 + \sigma_{gf}^2)$: estimativa da variância aditiva interpopulacional;

σ_{cec}^2 : estimativa da variância da capacidade específica de combinação interpopulacional entre dois genitores, a qual estima (1/4) da variação genética de dominância correspondente;

σ_{parc}^2 : estimativa da variância entre parcelas;

σ_ϵ^2 : estimativa da variância residual;

$\sigma_f^2 = \sigma_{gm}^2 + \sigma_{gf}^2 + \sigma_{cec}^2 + \sigma_{parc}^2 + \sigma_\epsilon^2$: estimativa da variância fenotípica interpopulacional;

$\sigma_{dom}^2 = 4\sigma_{cec}^2 / \sigma_f^2$: estimativa da variância de dominância interpopulacional;

$h_{am}^2 = h_a^2 = \sigma_a^2 / \sigma_f^2$: estimativa da herdabilidade individual no sentido restrito na população 1, ou seja, dos efeitos aditivos interpopulacionais;

h_{af}^2 : estimativa da herdabilidade individual no sentido restrito na população 2, ou seja, dos efeitos aditivos interpopulacionais;

$C_{cec}^2 = \sigma_{cec}^2 / \sigma_f^2$: estimativa do coeficiente de determinação dos efeitos da capacidade específica de combinação;

$h_{dom}^2 = \sigma_{dom}^2 / \sigma_f^2$: estimativa da herdabilidade individual dos efeitos interpopulacionais de dominância;

h_a^2 : estimativa da herdabilidade interpopulacional individual no sentido restrito, média para as duas populações;

$h_\epsilon^2 = \sigma_a^2 + (\sigma_{dom}^2 / \sigma_f^2)$: estimativa da herdabilidade interpopulacional individual no sentido amplo, ou seja, dos efeitos genotípicos totais;

h_{sob}^2 : estimativa da herdabilidade individual no sentido amplo para sobrevivência;

$C_{parc}^2 = \sigma_{parc}^2 / \sigma_f^2$: estimativa do coeficiente de determinação dos efeitos de parcela;

$A_{gm} = \sqrt{h_{gm}^2}$: acurácia geral de machos;

$A_{gf} = \sqrt{h_{gf}^2}$: acurácia geral de fêmeas;

$A_{gc} = \sqrt{h_a^2}$: acurácia geral de cruzamento;

$CV_{gp}(\%) = 100 \sqrt{0,5 \sigma_a^2 / m}$: coeficiente de variação genotípica entre progênes;

$CV_\epsilon(\%) = 100 \sqrt{\sigma_\epsilon^2 / m}$: coeficiente de variação residual;

$CV_r = CV_{EP}(\%) / CV_\epsilon(\%)$: coeficiente de variação relativa;
 m : média do caráter;
 $gmd = \sigma_a^2 / \sigma_a^2 + \sigma_d^2$: grau médio de dominância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação, sobrevivência e produtividade

Para todos os períodos e caracteres estudados, o teste da razão de verossimilhança (LRT) para efeitos genotípicos e de parcela apresentaram valores altamente significativos ($p < 0,01$). Isso indica que existe variabilidade genética e possibilidade para obtenção de ganhos com seleção (SEBBENN et al., 2008). Indica também que o ambiente no bloco não é homogêneo, mas como o coeficiente de determinação dos efeitos de parcela (C_{par}^2) foi baixo para os caracteres e idades de avaliação (variando de 0,010 a 0,073), denotando que o delineamento experimental utilizado (blocos casualizados) garantiu o controle ambiental no teste de progênes, logo, que as estimativas dos parâmetros por análise de variância são confiáveis.

Tabela 2. Parâmetros genéticos para crescimento em altura (ALT), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (VOL), aos 2, 5 e 7 anos de idade, em teste de progênes de polinização controlada de *Eucalyptus* sp.

Table 2. Genetic parameters for height (ALT), diameter at breast height (DAP) and volume (VOL) at 2, 5 and 7 years of age in a controlled pollinated progeny test (full siblings) of *Eucalyptus* sp.

	ALT2	ALT5	ALT7	DAP2	DAP5	DAP7	VOL2	VOL5	VOL7
LRT(G)	49,7**	70,4**	39,9**	41,4**	87,1**	60,8**	47,2**	97,2**	68,2**
LRT(P)	66,0**	44,5**	29,6**	40,6**	34,3**	27,6**	46,9**	37,1**	31,9**
C_{par}^2	0,071	0,073	0,039	0,018	0,017	0,010	0,031	0,018	0,014
h_{asob}^2 *	0,22	0,19	0,04	0,22	0,19	0,04	0,22	0,19	0,04
m	10,10	22,07	24,83	8,04	14,41	15,263	0,026	0,188	0,260
h_{am}^2	0,26±0,04	0,41±0,03	0,17±0,02	0,23±0,03	0,43±0,03	0,27±0,03	0,29±0,04	0,53±0,04	0,34±0,03
h_{af}^2	0,21	0,08	0,05	0,13	0,06	0,05	0,15	0,07	0,06
C_{cec}^2	0,042	0,022	0,025	0,027	0,021	0,021	0,031	0,023	0,021
h_{dom}^2	0,17	0,09	0,10	0,11	0,09	0,09	0,12	0,09	0,09
h_a^2	0,23	0,25	0,11	0,18	0,25	0,16	0,22	0,30	0,20
gmd	0,418	0,266	0,476	0,379	0,258	0,351	0,375	0,234	0,306
H_a^2	0,41	0,34	0,21	0,29	0,33	0,25	0,35	0,39	0,28
A_{gm}	0,763	0,885	0,788	0,786	0,900	0,858	0,807	0,9141	0,879
A_{gf}	0,829	0,795	0,732	0,803	0,771	0,746	0,815	0,7798	0,758
A_{gc}	0,853	0,874	0,841	0,820	0,892	0,867	0,840	0,905	0,878
$CV_{EP}(\%)$	4,5	3,7	5,7	5,3	6,2	8,5	13,5	16,5	20,6
$CV_\epsilon(\%)$	5,0	4,4	8,6	6,2	6,4	10,6	14,7	15,5	23,6
CV_r	0,90	0,85	0,66	0,85	0,96	0,80	0,92	1,07	0,87

LRT(G) e LRT(P) são o teste da razão de verossimilhança para genótipos e parcelas, respectivamente; **P < 0,01; C_{par}^2 : coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas; h_{asob}^2 : herdabilidade individual no sentido amplo para sobrevivência; m : média do caráter; h_{am}^2 e h_{af}^2 são a herdabilidade individual no sentido restrito para os machos e fêmeas, respectivamente; $\pm EP$: erro padrão da média; C_{cec}^2 : coeficiente de determinação dos efeitos da Capacidade Específica de Combinação; h_{dom}^2 : herdabilidade individual dos efeitos de dominância na população; h_a^2 : herdabilidade individual no sentido restrito para a população; gmd : grau médio de dominância; H_a^2 : herdabilidade individual no sentido amplo; A_{gm} , A_{gf} e A_{gc} são a acurácia geral de machos, fêmeas e geral de cruzamentos, respectivamente; $CV_{EP}(\%)$, $CV_\epsilon(\%)$ e CV_r são os coeficientes de variação genotípico entre progênes, residual e variação relativa, respectivamente; *Analisado pelo Modelo 183 por se tratar de variável binomial.

A sobrevivência foi alta variando de 88,6% aos 2 anos de idades a 83,5% aos 7 anos de idade, indicando alta adaptação dos genótipos resultantes dos cruzamentos ao ambiente. A herdabilidade individual no sentido amplo para sobrevivência (h_{asob}^2) decresceu com o aumento da idade (0,22 para 0,04), indicando que não há ação gênica sobre a sobrevivência (Tabela 2). Contudo, também

indica que aos 7 anos de idade, o controle genético para sobrevivência é baixo e terá baixo efeito na seleção entre as progênes.

As progênes apresentaram aos 7 anos de idade média geral de ALT (24,82 m), DAP (15,25 cm), o que corresponde a um VOL individual de 0,26 m³ e a uma produtividade média em VOL para o teste ou todos os cruzamentos realizados de 51,64 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, aplicado um fator de forma de 0,5 para o cálculo de VOL (Tabela 2). Esta produtividade por hectare é aproximadamente 5,7 vezes maior do que a apresentada por plantios de *Eucalyptus* na região na década de 70 (9,0 m³.ha⁻¹.ano⁻¹).

Parâmetros genéticos

A herdabilidade aditiva individual dos machos (h_{am}^2) para o caráter VOL variou de 0,29 aos 2 anos a 0,53 aos 5 anos e em seguida decresceu para 0,33 aos 7 anos de idade. Isto indica interação dos efeitos aditivos e ambientais, ao longo do período de crescimento das progênes em relação à população genitora masculina. Para a população feminina, os valores da herdabilidade individual no sentido restrito nas fêmeas (h_{af}^2), os valores são relativamente menores se comparados aos valores da população de machos, variando de 0,15 aos 2 anos para 0,06 aos 5 anos e decrescendo para 0,05 aos 7 anos de idade. Este resultado indica poucas possibilidades de ganhos genéticos advindos das mães (RESENDE, 2002b).

O coeficiente de determinação dos efeitos da capacidade específica de combinação (C_{cec}^2) está relacionado aos efeitos de dominância nos cruzamentos (RESENDE, 2007). Os valores para este coeficiente foram relativamente baixos, em torno de 0,02 para todas as idades e caracteres estudados. A herdabilidade individual dos efeitos de dominância da população segregante (h_{dom}^2) apresentou valores baixos para todas as idades e caracteres (variando de 0,09 a 0,17), conforme Resende et al. (1995), resultado que corrobora com os valores do C_{cec}^2 . Ressalta-se ainda que desvios de dominância são importantes na adaptação a variações ambientais como estresses biótico e abiótico.

A herdabilidade no sentido restrito em nível de plantas (h_a^2) variou entre os caracteres e idades de baixos (0,11) a médios (0,30), foram menores na idade de 7 anos e foram maiores para o VOL. Esta herdabilidade indica variabilidade genética que é herdável na população ou a quantidade relativa de variância genética útil para o melhoramento da descendência por propagação sexual (FALCONER, 1987). No presente estudo, a h_a^2 indica as boas perspectivas em relação ao ganho genético dos caracteres de crescimento. A variação observada entre idades e caracteres é coerente com os demais estudos com espécies de *Eucalyptus* spp para os mesmos caracteres e idades, (BERG et al., 2017; GARCIA; NOGUEIRA, 2005; ROCHA et al., 2007).

O coeficiente de variação genotípica entre progênes (CV_{ep}) foi baixo para os caracteres ALT e DAP (variando entre 3,7 a 8,5%) e medianos para VOL (13,5 a 20,6%), indicando o VOL como o caráter mais apropriado para seleção. Neste caso, o genótipo desempenha maior importância na expressão do fenótipo que o ambiente devido ao fato de que caracteres de ação poligênica como o volume possuem interações gênicas complexas, são altamente influenciados pelo ambiente, dificultando a identificação dos genótipos superiores com base no fenótipo (BESPALHOK et al., 2007a). Daí a importância de se conhecer o valor da ação gênica que predomina na formação dos novos genótipos, se aditiva, de dominância e epistática. Somente os efeitos aditivos conferem segurança aos ganhos preditos no programa de melhoramento (BESPALHOK et al., 2007b).

O grau médio de dominância (gmd) apresentou valores entre 0,35 para VOL a 0,47 para ALT ambos aos 7 anos de idade das plantas. Estes valores indicam que os locos em heterozigose estão contribuindo consideravelmente para a maior capacidade de resposta às variações ambientais (RESENDE, 2002b). Contudo, na fase crítica de estabelecimento das plantas, que ocorre aos dois primeiros anos de vida, quando os genótipos deixam as condições favoráveis do viveiro, com controle de irrigação, fertilização e manejo de insolação, para a condição extremamente inóspita do campo, os fatores genéticos aditivos e de dominância são mais pronunciados. A partir desta fase, com as plantas já estabelecidas, os fatores ambientais são mais determinantes e o sucesso do empreendimento é em grande parte dependente do manejo do ambiente (tratos culturais: mato competição, adubação, controle de pragas e doenças).

A herdabilidade individual entre os sexos no sentido amplo (H_a^2) foi mediana, variando entre caracteres e idades de 0,21 a 0,41, foi menor em todos os caracteres na idade de 7 anos. Estes valores indicam a possibilidade de sucesso no aumento da produtividade por seleção dentro da população.

As acurácias de machos (A_{gm}), de fêmeas (A_{gf}) e dos cruzamentos (A_{gc}) foram relativamente altas ($> 0,75$), conforme classificação de Resende et al. (1995). Isto indica que a seleção a ser realizada terá garantia de acerto acima de 70% e reforça que o desenho experimental foi eficiente para garantir o controle dos efeitos ambientais (NUNES et al., 2016; RESENDE; DUARTE, 2007).

O coeficiente de variação experimental (CV_e) foi similar, embora geralmente maior do que o CV_{gp} . Isso resultou em um coeficiente de variação relativa (CV_r) em geral maior do que 0,85, variando de 0,65 para ALT7 (0,65) a 1,07 para VOL. Como valores próximos de unidade (1) indicam forte relação entre efeitos genotípicos e ambientais (MAIA et al., 2009), logo existe alta probabilidade de obter-se ganhos genéticos com a seleção. Os resultados deste estudo confirmam que o material testado tem alto potencial para ser melhorado pela seleção.

Seleção dos materiais genéticos

A partir da classificação dos cruzamentos (Tabela 3), com base no valor genético aditivo e no ponto de corte do VOL de $65 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ foi efetuada a seleção dos 32 melhores cruzamentos, ou seja, famílias com maior produtividade volumétrica. Este volume de corte representa um aumento na produtividade volumétrica por hectare de aproximadamente 7,2 vezes maior do que a apresentada por plantios de *Eucalyptus* na região na década de 70 ($9,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) e 1,3 vezes maior que o do teste ($51,64 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$). Contudo, para aumentar fortemente a produtividade recomenda-se três estratégias de seleção: i) estabelecer um pomar de recombinação por polinização aberta, composto de 256 indivíduos, sendo oito por cruzamento (o melhor de cada repetição) cujo rendimento médio é de $74,24 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$; ii) estabelecer um pomar de hibridação por polinização controlada, composto de 65 indivíduos, sendo um por cruzamento (o melhor) totalizando 32 filhos, mais os 16 melhores genitores femininos e mais os 17 genitores masculinos, com produtividade média também de $74,24 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$; no intuito de se dar prosseguimento aos trabalhos de melhoria contínua da produtividade pela Seleção Recorrente Recíproca (SRR) a médio e longo prazos e, iii) Com base na variância genética total, a partir da classificação das progênies sugere-se selecionar os 10 melhores indivíduos para clonagem (Tabela 4), objetivando ganhos a curto prazo. Esta população tem rendimento médio de $86,08 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Para as estratégias de seleção I e II, o aumento da produtividade foi 1,4 vezes e para a situação III foi 1,7 maior que o do teste ($51,64 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$).

Tabela 3. Seleção dos cruzamentos (Cruz) que produziram rendimentos florestais iguais ou superiores a $65 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ aos sete anos de idade.

Table 3. Selection of crosses that produced forest yields equal to or greater than $65 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ at seven years of age.

Classificação	Crescimento (m^3)			Genitor feminino		Genitor masculino	
	Cruz	Individual	ha/ano	Nome	Especie	Nome	Especie
1	278	0,4219	83,29	3.026	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran006	<i>E. grandis</i>
2	117	0,4061	80,17	2.044	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Sal784	<i>E. saligna</i>
3	428	0,4008	79,13	3.052	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran045	<i>E. grandis</i>
4	420	0,3976	78,49	3.052	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran004	<i>E. grandis</i>
5	251	0,3956	78,10	3.026	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran005	<i>E. grandis</i>
6	132	0,3937	77,72	2.044	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Salxbot098	<i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>
7	62	0,3913	77,25	1.294	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran004	<i>E. grandis</i>
8	292	0,3880	76,60	3.026	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Salxbot098	<i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>
9	320	0,3852	76,05	3.336	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran004	<i>E. grandis</i>
10	274	0,3810	75,22	3.026	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Salxbot112	<i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>
11	280	0,3775	74,53	3.026	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran045	<i>E. grandis</i>
12	131	0,3744	73,91	2.044	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Salxbot112	<i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>
13	325	0,3712	73,28	3.336	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran045	<i>E. grandis</i>
14	393	0,3675	72,55	3.351	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0099	Hib. esp. <i>E. urophylla</i>
15	293	0,3639	71,84	3.025	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Salxbot784	<i>E. saligna</i> x <i>E. botryoides</i>
16	202	0,3608	71,23	3.024	<i>E. urophylla</i> (Timor)	Gran004	<i>E. grandis</i>
17	410	0,3579	70,66	3.052	<i>E. urophylla</i> (Timor)	4.206	<i>E. urophylla</i> (Flores)
18	431	0,3552	70,12	3.052	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0760	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
19	358	0,3524	69,57	3.046	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0099	Hib. esp. <i>E. urophylla</i>
20	396	0,3499	69,08	3.512	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0099	Hib. esp. <i>E. urophylla</i>
21	491	0,3476	68,62	4.206	<i>E. urophylla</i> (Flores)	Gran106	<i>E. grandis</i>
22	504	0,3455	68,21	4.254	<i>E. urophylla</i> (Flores)	Gran045	<i>E. grandis</i>
23	30	0,3435	67,81	1.254	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0099	Hib. esp. <i>E. urophylla</i>
24	237	0,3417	67,46	3.025	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC1559	<i>E. uro</i> x [<i>E. uro</i> (<i>E. cam</i> x <i>E. gran</i>)]

Tabela 3 - Continuação. Seleção dos cruzamentos (Cruz) que produziram rendimentos florestais iguais ou superiores a 65 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ aos sete anos de idade.

Table 3 - Continuation. Selection of crosses that produced forest yields equal to or greater than 65 m³.ha⁻¹.year⁻¹ at seven years of age.

Classificação	Cruz	Crescimento (m ³)		Genitor feminino		Genitor masculino	
		Individual	ha/ano	Nome	Especie	Nome	Especie
25	317	0,3400	67,12	3.336	<i>E. urophylla</i> (Timor)	4.206	<i>E. urophylla</i> (Flores)
26	447	0,3384	66,81	4.199	<i>E. urophylla</i> (Flores)	AEC1513	<i>E. uro</i> x [<i>E. uro</i> (<i>E. cam</i> x <i>E. gran</i>)]
27	47	0,3369	66,51	1.294	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC1633	<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>
28	36	0,3355	66,23	1.254	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0060	<i>Hib. esp.</i> <i>E. urophylla</i>
29	28	0,3341	65,96	1.254	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC0258	<i>Hib. esp.</i> <i>E. urophylla</i>
30	9	0,3327	65,68	1.034	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC1633	<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>
31	490	0,3314	65,42	4.026	<i>E. urophylla</i> (Flores)	AEC0060	<i>Hib. esp.</i> <i>E. urophylla</i>
32	416	0,3302	65,19	3.052	<i>E. urophylla</i> (Timor)	AEC1513	<i>E. uro</i> x [<i>E. uro</i> (<i>E. cam</i> x <i>E. gran</i>)]

São 32 cruzamentos onde participaram 16 genitores femininos e 17 genitores masculinos.

Tabela 4. Relação dos indivíduos a serem clonados.

Table 4. Relation of individuals to be cloned.

Ranking	Cruzamento	Bloco	Árvore	Crescimento (m ³)	
				Individual	Por ha/ano
1	420	5	4	0,4436	87,63
2	278	5	1	0,4429	87,49
3	251	5	6	0,4395	86,82
4	420	3	1	0,4378	86,48
5	278	3	5	0,4360	86,13
6	132	8	1	0,4343	85,79
7	117	2	1	0,4328	85,49
8	292	6	1	0,4314	85,22
9	278	8	4	0,4303	85,00
10	420	7	1	0,4294	84,82
Média				0,4358	86,08

CONCLUSÕES

- As famílias de híbridos interespecíficos resultantes dos cruzamentos realizados apresentam variabilidade genética para todos os caracteres e idades avaliadas;
- As estratégias de seleção propostas predizem altos ganhos genéticos e o aumento da produtividade dos plantios da região estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, T. F. Melhoramento genético do eucalipto. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 18, n. 185, p. 32-51, 1996.

ASSIS, T. F.; HENRIQUES, E. P.; FERNANDES, J. C. *Relatório técnico descritivo para obtenção do registro nacional dos cultivares*: relatório n. 1: espécies puras. Itamarandiba: Arcelor Mittal BioEnergia, 2007. 11 p.

BERG, G. D.; VERRY, S. D.; CHIRWA, P. W.; DEVENTER, F. Realised genetic gains and estimated genetic parameters of two *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* hybrid breeding strategies. *Southern Forests*, Pretoria, p.1-11, 2017. Doi: 10.2989/20702620.2016.1263010.

BESPALHOK F. J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. Noções de Genética Quantitativa. In: BESPALHOK F. J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. *Melhoramento de Plantas*. Curitiba: FUPEF, 2007a.

BESPALHOK F. J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. Introdução ao Melhoramento de Plantas. In: BESPALHOK F. J. C.; GUERRA, E. P.; OLIVEIRA, R. *Melhoramento de Plantas*. Curitiba: FUPEF, 2007b.

BOUDET, A. M. A. New view of lignification. *Trends in Plant Science*, v. 3, p. 67-71, 1998.

- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003. v.2. 585 p.
- FALCONER, D. S. **Introdução à genética quantitativa**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1987. 279 p.
- GARCIA, C. H.; NOGUEIRA, M. C. S. N. Utilização da metodologia REML/BLUP na seleção de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 107-112, 2005.
- GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais para reflorestamento**. Belo Horizonte: PNUD/FAO/IBDF, 1975. 65 p. (Série Técnica BRA/71/545).
- HENDERSON, C. R.; KEMPTHORNE, O.; SEARLE, S. R.; KROSIGK VON, C. M. The estimation of environmental and genetic trends from records subject to culling. **Biometrics**, v.15, n. 6, p. 192-218, 1959.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual: ano base 2015**. Brasília: IBA, 2016. 96 p.
- MAIA, M. C. C.; RESENDE, M. D. V.; PAIVA, J. R.; CAVALCANTI, J. J. V.; BARROS, L. M.. Seleção simultânea para produção, adaptabilidade e estabilidade genotípicas em clones de cajueiro, via modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 1, p.43-50, 2009.
- NUNES, A. C. P, SANTOS, G. A, RESENDE, M. D. V, SILVA, L. D, HIGA, A ASSIS, T. F. Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.44, n.111, p. 563-574, 2016.
- RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v.16, p.330-339, 2016.
- RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 562 p
- RESENDE, M. D. V. **SELEGEN-REML/BLUP - Seleção genética computadorizada: manual do usuário**. Colombo: Embrapa – CNPF, 2002a b. 67p.
- RESENDE, M. D. V. **Genética Biométrica e Estatística no Melhoramento de Plantas Perenes**. Brasília: Embrapa informações tecnológicas, 2002b. 975 p.
- RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, p. 182-194, 2007.
- RESENDE, M. D. V.; HIGA, A. R. Estratégias de melhoramento para eucaliptos visando a seleção de híbridos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 21, p. 49-60, 1990.
- RESENDE, M. D. V.; ARAÚJO, A. J.; SAMPAIO, P. T. B.; WIECHETECK, M. S. S. Accuracy, confidence ranges and variance of response associated to 22 selection methods in *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 24, p. 34-45, 1995.
- ROCHA, M. G. B.; PIRES, I. E.; ROCHA, R. B.; XAVIER, A.; CRUZ, C. D. Seleção de genitores de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus urophylla* para produção de híbridos interespecíficos utilizando REML/ BLUP e informação de divergência genética. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 977-987, 2007.
- SEBBENN, A. M.; VILAS BOAS, O.; MAX, J. C. M. Altas herdabilidades e ganhos na seleção para caracteres de crescimento em teste de progenies de polinização aberta de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* aos 25 anos de idade em Assis –SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 95-102, 2008.

Recebido em 02/05/2017

Aceito em 18/01/2018

