

Métodos e Estratégias de Melhoramento de Espécies Perenes: Estado da Arte e Perspectivas

Marcos Deon Vilela de Resende¹
Márcio Henrique Pereira Barbosa²
Gabriel Dehon S.P. Rezende³
Aurélio Mendes Aguiar³
Luiz Antônio dos Santos Dias²
José Alfredo Sturion¹

1. Resumo

As plantas perenes são de grande importância econômica em países tropicais como o Brasil. Culturas como as do eucalipto, cana-de-açúcar, café, laranja, cacau e caju são cultivadas em extensas áreas e são importantes fontes de divisas para o Brasil. Também, espécies forrageiras como a braquiária e Panicum são de grande importância pois são a base para a bovinocultura de corte e de leite no país. As principais espécies de cultivos perenes podem ser agrupadas nas seguintes categorias: 1. Espécies Florestais (eucalipto, pinus, acácia, seringueira); 2. Fruteiras (laranja, banana, acerola, caju, cupuaçú, manga, maçã, uva) ; 3. Forrageiras e Cana-de-Açúcar; 4. Plantas Estimulantes (café, cacau, guaraná, erva-mate); 5. Palmáceas (coco, dendê, açaí, pupunha, palmeira real). O melhoramento dessas categorias de espécies apresenta peculiaridades que precisam ser consideradas no delineamento de eficientes métodos e estratégias de melhoramento.

Na adequada definição dos métodos e estratégias de melhoramento a serem empregados é necessário considerar a natureza do caráter sob melhoramento. Os caracteres de importância econômica podem ser divididos, grosso modo, em caracteres qualitativos (monogênicos ou oligogênicos) e quantitativos (poligênicos). Os caracteres qualitativos podem ser melhorados de forma mais

¹ Embrapa Florestas: deon@cnpf.embrapa.br, sturion@cnpf.embrapa.br

² Universidade Federal de Viçosa: barbosa@ufv.br, lasdias@ufv.br

³ Aracruz Celulose S.A: gdr@aracruz.com.br, amendes@aracruz.com.br

direta por meio da transferência de alelos/genes via as seguintes alternativas: (i) retrocruzamentos (transferência de alelos); (ii) retrocruzamentos monitorados por marcadores moleculares (transferência de alelos); (iii) transgenia (transferência de genes).

O melhoramento genético de caracteres quantitativos (controlados por um grande número de genes e/ou sujeitos a elevada influência ambiental, apresentando herdabilidades baixas) geralmente baseia-se em três estratégias globais: (i) melhoramento e seleção dentro de população; (ii) melhoramento e seleção em populações sintéticas ou compostos; (iii) melhoramento do cruzamento ou híbrido entre indivíduos de diferentes populações. As estratégias de melhoramento correspondentes são respectivamente: (i) seleção recorrente intrapopulacional (SRI); (ii) seleção recorrente intrapopulacional em população sintética (SRIPS); seleção recorrente recíproca (SRR). A seleção recorrente, caracterizada por um processo seletivo em vários ciclos é o principal força capaz de melhorar os caracteres quantitativos. Para tais caracteres, devido ao elevado número de genes, não é possível atingir o objetivo do melhoramento em apenas um ciclo seletivo. Em plantas perenes, as estratégias de seleção recorrente assumem grande importância devido à necessidade de se obter o maior ganho possível em cada ciclo seletivo.

As estratégias de melhoramento adotadas em cada categoria de plantas apresentam estreita relação com os sistemas de propagação do material melhorado e com a utilização ou não da heterose. Os caracteres de interesse econômico podem não apresentar heterose devido à ausência de dominância alélica no controle do caráter sob melhoramento ou ausência de divergência genética entre as populações usadas no melhoramento. A maioria dos caracteres produtivos de importância econômica apresenta heterose e, portanto, deveriam ser melhorados via SRR. Um refinamento da SRR em programas avançados de melhoramento é a seleção recorrente recíproca individual (SRRI).

A SRRI difere da SRR populacional porque na SRRI a seleção recorrente recíproca é conduzida entre apenas dois genitores com alta capacidade específica

de combinação e alta média do cruzamento. Estes genitores são autofecundados gerando duas populações S_1 , que são melhoradas, uma em função da outra. Este esquema tem sido empregado no melhoramento das seguintes espécies perenes predominantemente alógamas: *E. grandis* x *E. urophylla*, dendê, e possivelmente em braquiária, *Panicum*, café canéfora, cacau, cana-de-açúcar e caju.

Programas modelo de melhoramento são aqueles conduzidos atualmente no Brasil com a cana-de-açúcar (SRIPS) e eucalipto (SRR e SRRI). Estes programas têm a participação direta do setor industrial e caracterizam-se pela eficiência e dinamismo, gerando anualmente novos cultivares melhorados. Várias espécies de fruteiras seguem o melhoramento via SRIPS (fruteiras tradicionais) e SRI (espécies em fases iniciais de melhoramento). O mesmo comentário é válido para as plantas estimulantes. Dentre as palmáceas, espécies como o dendê e o coco seguem a SRR e SRRI e as demais seguem a SRI.

Espécies que apresentam indivíduos apomíticos e também sexuados são comuns dentre as plantas forrageiras, como o capim-colonião (*Panicum maximum*) e a braquiária (*Brachiaria* spp.). Tais espécies têm apresentado heterose no cruzamento entre plantas apomíticas (fornecedoras de pólen) e sexuais (utilizadas como genitores femininos). Neste caso, a estratégia ideal de melhoramento é a seleção recorrente recíproca. No entanto, não é possível a recombinação na população apomítica. Dessa forma, a população sexual deve ser melhorada em função da população apomítica, ou seja, dos indivíduos apomíticos em cruzamento. Assim, a recombinação ocorrerá apenas em uma das populações. Com o avanço do programa de melhoramento pode-se escolher apenas um genótipo elite da população assexuada e melhorar a população sexual em função de apenas um indivíduo apomítico, usado como testador. Outra opção é a utilização da SRRI, porém, com recombinação em apenas uma população S_1 . É importante relatar que, nessas espécies, os cultivares comerciais são apomíticos, ou seja, são clones cultivados via sementes.

Cerca de oito opções de SRR podem ser aplicadas a espécies perenes, sendo que as mais eficientes são: SRR com genitores e híbridos intermediários entre os

híbridos do primeiro e do segundo ciclo de SRR (SRR-G-HI); SRR com progênies S_1 e híbridos intermediários (SRR- S_1 -HI).

Os principais fatores que ditam o sucesso de um programa de melhoramento são: (i) estratégia adequada de melhoramento; (ii) eficiência no processo seletivo; (iii) curtas gerações de melhoramento. A eficiência do processo seletivo é dada, sobretudo, por uma adequada abordagem conceitual que deve ser aplicada no processo de avaliação genética dos candidatos à seleção. Atualmente, a abordagem ótima e padrão é o procedimento REML/BLUP para estimação de componentes de variância/predição de valores genéticos. Tal procedimento conduz a máxima acurácia seletiva e máximo ganho genético. A eficiência do processo seletivo depende também de uma adequada experimentação em termos de delineamentos experimentais eficientes e adequado tamanho de parcela e de blocos. Em plantas perenes, experimentos (exceto aqueles na fase final de recomendação de cultivares) com uma planta por parcela propiciam uma série de vantagens.

Os melhoristas de plantas perenes necessitam encurtar os ciclos seletivos e ter maior agressividade no lançamento de cultivares. Acumular dados experimentais na mesma geração pouco impacta o melhoramento de plantas perenes. A perspectiva é de que ciclos mais curtos serão necessários principalmente nos programas de melhoramento desenvolvidos por instituições públicas. A velocidade de troca de cultivares melhorados é um fator essencial na competitividade do agronegócio. As ferramentas precisas de seleção atualmente disponíveis (REML/BLUP) permitem a adoção segura da seleção precoce.

Em muitas espécies se passará a utilizar a heterose e, portanto, alterações nas metodologias e estratégias de melhoramento serão necessárias. Como exemplo cita-se o café arábica, em que o domínio da clonagem em escala comercial permitirá explorar a heterose e deverá mudar (para a SRR) drasticamente os métodos de melhoramento que hoje são típicos de espécies autógamas (cruzamento entre linhagens e seleção pelos métodos do bulk e

pedigree). O domínio da clonagem em palmáceas também causará impacto nas estratégias de melhoramento em várias espécies em que hoje pratica-se a SRI.

Seleção para novos sistemas de produção serão também necessários. Por exemplo, a seleção de materiais para cultivos mais adensados em café e dendê poderá ser realizada de forma eficiente por meio do emprego de modelos de competição genotípica no contexto dos modelos de avaliação genética.

Novas espécies utilizadas como fonte de novos produtos passarão a ser melhoradas. Dentre essas, estarão plantas medicinais e espécies arbóreas madeireiras e frutíferas de uso múltiplo as quais são muito importantes no desenvolvimento rural sustentado em regiões mais pobres e com menor qualidade de vida (África e América tropical e semi-árida). Nessas regiões tais espécies são relevantes como fatores mitigadores da fome e, portanto, precisam receber a atenção dos melhoristas. Nesse caso, os métodos de melhoramento serão aqueles tradicionalmente empregados concomitantemente ao processo de domesticação e deverão ter também uma natureza participativa.

Espera-se também contribuições dos vários projetos genômicos que estão sendo desenvolvidos em várias espécies perenes como o eucalipto, a cana-de-açúcar, a laranja, o caju.

2. Panorama Geral das Espécies Perenes no Brasil

As plantas perenes são de grande importância econômica em países tropicais como o Brasil. Culturas como as do eucalipto, cana-de-açúcar, café, laranja e caju são cultivadas em extensas áreas e são grandes fontes de divisas para o Brasil. Também, espécies forrageiras como a braquiária e Panicum são de grande importância pois são a base para a bovinocultura de corte e de leite no país. As principais espécies de cultivos perenes podem ser agrupadas nas seguintes categorias: 1. Espécies Florestais (eucalipto, pinus, acácia, seringueira); 2. Fruteiras (laranja, banana, acerola, caju, cupuaçú, manga, maçã, uva, pêssego) ; 3. Forrageiras e Cana-de-Açúcar; 4. Plantas Estimulantes (café, cacau, guaraná, erva-mate); 5. Palmáceas (coco, dendê, açaí, pupunha, palmeira real). Em termos de área tem-se no país: cerca de 220 milhões de hectares com pastagens, cerca

de 40 milhões de hectares com culturas anuais e cerca 20 milhões de hectares com culturas perenes (exceto forrageiras). Em termos de produtos, o Brasil apresenta os seguintes rankings em termos de produção mundial: primeiro lugar em produção de celulose de eucalipto, cana-de-açúcar (açúcar e álcool), laranja e café; segundo lugar em produção de soja, milho, carne bovina e carne de aves; terceiro lugar em produção de frutas. Esses dados reforçam a importância das plantas perenes para o país.

Excetuando-se as palmáceas, pinus, acácia e café arábica, as demais são cultivadas por meio de propagação assexuada via vegetativa ou via apomixia. Espécies com potencial para propagação vegetativa em escala comercial são o pinus e o café arábica. A maioria (exceto café arábica e pessegueiro) de todas essas espécies mencionadas são predominantemente alógamas. No entanto, a estratégia básica (cruzamento entre genitores, seguido por seleção clonal nas progênies) de melhoramento empregada nestas espécies de propagação assexuada independe se a espécie é alógama ou autógama por natureza. Por exemplo, a mesma estratégia básica é aplicada em macieira (alógama) e em pessegueiro (autógama).

Algumas obras que tratam do melhoramento de plantas perenes no Brasil são: Barbosa (2000), Barcelos (2000), Bruckner (1999, 2001), Dias (2001), Ferreira & Pereira (1999), Matsuoka et al. (1999), Pereira et al. (2001), Resende (1999, 2002a), Resende & Barbosa (2005), Sera (1998), Siqueira et al. (1998).

3. Estratégias Globais de Melhoramento Genético de Características Quantitativas

O melhoramento genético de caracteres quantitativos geralmente baseia-se em três estratégias globais.

(a) Melhoramento e seleção dentro de população

Esta estratégia visa o melhoramento do valor genético aditivo (a) médio da população por meio de vários ciclos seletivos via seleção recorrente intrapopulacional (SRI). Neste processo melhora-se também, de forma indireta, o valor genotípico ($g = a + d$, em que d é o efeito de dominância ou contribuição dos locos em heterozigose) médio da população. Esta estratégia é comumente adotada em várias espécies de plantas perenes, alógamas e com sistema reprodutivo misto, visando a utilização em plantios via sementes (exploração de a) ou clonagem (exploração de g). É geralmente adotado em estágios iniciais do melhoramento de cada espécie.

(b) Melhoramento e seleção em populações sintéticas ou compostos

Esta estratégia baseia-se na formação de uma nova população e visa aos mesmos objetivos da situação anterior, ou seja, melhoramento do valor genético aditivo médio via SRI e, de forma indireta, do valor genotípico. Entretanto, a população sintética origina do cruzamento entre diferentes populações, linhagens ou raças. Este fato conduz a uma maior variabilidade e heterozigose na população. A maior variabilidade culmina com a possibilidade de obtenção e seleção de indivíduos segregantes transgressivos em termos de valor genético aditivo. A maior heterozigose possibilita aumentar o efeito de dominância ou contribuição dos locos em heterozigose e, conseqüentemente, contribui também para aumentar o valor genotípico dos indivíduos. Esta estratégia é utilizada no melhoramento da maioria das espécies de plantas e animais. Em plantas autógamas é a principal estratégia utilizada na obtenção de segregantes transgressivos. O processo de melhoramento é a seleção recorrente intrapopulacional em população sintética (SRIPS).

(c) Melhoramento do cruzamento ou híbrido entre populações

Esta estratégia visa o melhoramento da média do cruzamento entre duas ou mais populações (ou indivíduos) divergentes. E o melhoramento da média do cruzamento implica melhorar, simultaneamente, a média do valor genético aditivo interpopulacional das duas populações bem como a heterose do cruzamento entre as mesmas. A heterose é função direta da divergência genética entre as populações e do grau de dominância do caráter sob melhoramento. O processo de melhoramento da média do cruzamento e da heterose é a seleção recorrente recíproca (SRR) ou interpopulacional (Comstock et al., 1949). A SRI aplicada às duas populações é também capaz de melhorar a média do cruzamento mas não melhora a heterose, sendo assim, um procedimento inferior quando o grau de dominância é considerável e existe divergência genética. Comparações entre a SRR e SRI para o melhoramento do híbrido interpopulacional são apresentadas por Wricke & Weber (1986), Gallais (1989) e Resende (2002a, pág. 718).

A exploração prática comercial da heterose dos cruzamentos ou híbridos tem sido o principal foco dos programas de melhoramento de animais (bovinos, suínos, ovinos e aves), plantas predominantemente alógamas anuais (milho, girassol e algumas hortaliças) e perenes (florestais, fruteiras, palmáceas, estimulantes, forrageiras, cana-de-açúcar), autógamias perenes com propagação vegetativa (pessegueiro) e autógamias anuais com facilidade de produção de sementes híbridas via polinização controlada (tomate). Mas a SRR não é adotada para o melhoramento de todas estas espécies. Em muitos casos a SRIPS é usada em lugar da SRR, como por exemplo em cana-de-açúcar.

4. Estratégias de Seleção Recorrente em Função dos Aspectos Biológicos das Espécies

As estratégias de melhoramento adotadas em plantas apresentam estreita relação com os sistemas de propagação e com a utilização ou não da heterose. A seguir é apresentada uma classificação genérica dessas estratégias.

(I) Seleção Recorrente Intrapopulacional (SRI ou SRIPS)

(a) Utilização de sementes de polinização aberta para plantios comerciais

Esta estratégia é utilizada em espécies que não permitem uma eficiente propagação vegetativa e/ou que não apresentam considerável heterose ou capacidade específica de combinação para os caracteres de interesse econômico. As espécies podem não apresentar heterose devido à ausência de dominância alélica no controle do caráter sob melhoramento ou ausência de divergência genética entre as populações usadas no melhoramento. É empregado nas seguintes espécies perenes predominantemente alógamas: pinus, acácia negra, erva-mate, pupunha, palmeira real, açaí, eucalipto (para pequenos produtores).

(b) Utilização de sementes de polinização controlada para plantios comerciais

Esta estratégia tem sido aplicada em espécies com as mesmas características descritas em (a), porém com facilidade de realização de polinização controlada. Neste caso, a grande vantagem refere-se à maximização da intensidade de seleção. Usado nas seguintes espécies perenes predominantemente alógamas: *Pinus radiata* na Nova Zelândia, *Eucalyptus globulus* em Portugal, na Austrália e no Chile.

(c) Utilização de clones para plantios comerciais

Esta estratégia é utilizada em espécies que permitem a propagação vegetativa em escala comercial e não apresentam considerável heterose no

germoplasma usado, devido à baixa divergência genética. Este procedimento também maximiza a intensidade de seleção, capitaliza a heterozigose (e o efeito de dominância) e permite obter homogeneidade dos produtos. Em espécies alógamas nas quais o interesse reside nos frutos, pode ser necessário o plantio de vários clones sexualmente compatíveis e não apenas um. Usado em populações sintéticas das seguintes espécies perenes predominantemente alógamas: cana-de-açúcar, seringueira, mandioca, caju, acerola, guaraná, cupuaçu, capim elefante. Usado também em pessegueiro que é uma espécie autógama perene.

(d) Utilização de linhagens puras para plantios comerciais via sementes

Este procedimento é empregado em espécies autógamas anuais (soja, feijão, arroz, trigo, aveia, cevada, amendoim) e perenes (café arábica e *Leucena leucocephala*).

(e) Utilização de linhagens parcialmente puras para plantios comerciais via sementes

Este procedimento é empregado em espécies com sistema reprodutivo misto, porém com predominância da autogamia. Exemplos típicos são o algodão, o *Stylosanthes guianensis* e a mamona. Nestas espécies, a taxa de autofecundação varia de 60 a 95% aproximadamente. Assim, o conceito de linhas completamente puras não é aplicado. Neste caso, linhagens parciais irmãs podem ser utilizadas como mistura em um plantio comercial. Tais linhagens podem ser selecionadas dentro de um cultivar ou acesso, os quais apresentam determinada variabilidade genética ditada pela taxa de cruzamento. Teste de progênies destas seleções permitem a seleção de linhagens irmãs (por exemplo dentro de uma progênie S1 ou de polinização aberta) as quais são similares e podem ser misturadas e multiplicadas dando origem a um novo cultivar. Linhagens parciais irmãs podem também ser selecionadas a partir de população sintética advinda do cruzamento entre diferentes linhagens ou acessos.

(II) Seleção Recorrente Recíproca entre Populações Divergentes (SRR)

(f) Utilização de sementes de polinização controlada para plantios comerciais

Esta estratégia é empregada nas espécies com as seguintes características: considerável heterose dada por dominância alélica e divergência genética entre populações; ausência de propagação vegetativa eficiente; facilidade de polinização controlada. Usado em espécies alógamas anuais (milho, girassol e algumas hortaliças) e perenes (coco, dendê). Usado também em tomate (autógama anual). Em dendezeiro e coqueiro, em geral, são usadas linhagens S_1 (uma geração de autofecundação) para obtenção dos híbridos comerciais, visto que a quantidade de material reprodutivo (pólen e sementes) produzido pelos genitores não endógamos não é suficiente. Nas linhagens S_1 são utilizados vários indivíduos para a produção de pólen e semente.

(g) Utilização de clones para plantios comerciais

Este procedimento é utilizado em espécies que propiciam eficiente propagação vegetativa e que apresentam considerável heterose para os caracteres de interesse. Usado nas seguintes espécies perenes predominantemente alógamas: *E. grandis* x *E. urophylla*, café canéfora, cacau e possivelmente em cana-de-açúcar e caju, dependendo das populações utilizadas.

(III) Seleção Recorrente Recíproca Individual (SRR)

Neste procedimento, a seleção recorrente recíproca é conduzida entre apenas dois genitores com alta capacidade específica de combinação e alta média do cruzamento. Estes genitores são autofecundados gerando duas populações S_1 , que são melhoradas, uma em função da outra. Este esquema tem sido empregado no melhoramento das seguintes espécies perenes predominantemente alógamas:

E. grandis x *E. urophylla*, dendê, e possivelmente em braquiária, *Panicum*, café canéfora, cacau, cana-de-açúcar e caju.

Espécies que apresentam indivíduos apomíticos e também sexuados são comuns dentre as plantas forrageiras, como o capim-colonião (*Panicum maximum*) e a braquiária (*Brachiaria* spp.). Tais espécies têm apresentado heterose no cruzamento entre plantas apomíticas (fornecedoras de pólen) e sexuais (utilizadas como genitores femininos). Neste caso, a estratégia ideal de melhoramento é a seleção recorrente recíproca. No entanto, não é possível a recombinação na população apomítica. Dessa forma, a população sexual deve ser melhorada em função da população apomítica, ou seja, dos indivíduos apomíticos em cruzamento. Assim, a recombinação ocorrerá apenas em uma das populações. Com o avanço do programa de melhoramento pode-se escolher apenas um genótipo elite da população assexuada e melhorar a população sexual em função de apenas um indivíduo apomítico, usado como testador. Outra opção é a utilização da SRRI, porém, com recombinação em apenas uma população S_1 . É importante relatar que, nessas espécies, os cultivares comerciais são apomíticos, ou seja, são clones cultivados via sementes.

Detalhes do melhoramento de espécies no contexto dos itens (a) e (b) foram apresentados por Resende (1999). No que se refere aos itens (d) e (f) detalhes são apresentados por Ramalho et al. (2001) e Souza Júnior (2001), respectivamente. Resende & Barbosa (2005) enfocam os itens (c), (g) e (III), complementando os aspectos relatados por Barbosa (2000), Resende (2001; 2002a) e Dias & Resende (2001a).

5. Estratégias de Melhoramento de Plantas Perenes

5.1. Seleção Recorrente Intrapopulacional – Modelo Cana-de-Açúcar e Frutíferas

Em algumas espécies como a cana-de-açúcar, cacau e espécies frutíferas, o esquema adotado é, embora não explicitamente, a seleção recorrente

intrapopulacional (SRI). Os clones superiores gerados ao final do procedimento básico (cruzamento seguido pela seleção clonal) são intercruzados (recombinação) para a geração das famílias híbridas de um novo ciclo seletivo. É importante relatar que as espécies são perenes e, portanto, há sobreposição de gerações e clones de diferentes gerações são intercruzados e não apenas aqueles de determinado ciclo seletivo. Neste caso, a SRI é geralmente aplicada em populações sintéticas (SRIPS). Esse esquema é mais eficiente em espécies que não apresentam elevada heterose e/ou divergência genética no material sob melhoramento. Caso contrário, a SRR deve ser preferida.

Nesse caso (SRIPS), a seleção recorrente intrapopulacional não é conduzida da maneira usual com: obtenção de progênies, avaliação e seleção de progênies, recombinação de progênies. O esquema empregado em cana-de-açúcar e fruteiras é: obtenção de progênies, avaliação de clones pertencentes a essas progênies, seleção de clones como novas cultivares, cruzamentos entre esses clones e/ou cultivares juntamente com outros clones e/ou cultivares gerados em outros programas de melhoramento. Assim, a população experimental é “re-sintetizada” em cada ciclo seletivo, ou seja, não é a mesma população inicial do primeiro ciclo. A seleção recorrente intrapopulacional tradicional é mais fechada na mesma população e também não envolve avaliação clonal e cruzamento entre clones elites de origens diversas, os quais são incorporados em cada ciclo seletivo ou geração.

Outro esquema é o cruzamento entre genitores potenciais selecionados nos testes de famílias, com base em seus valores genéticos aditivos ou valores alélicos. Tal esquema é usado, por exemplo, em acerola e populações sintéticas de eucalipto e constitui a SRI propriamente dita. É usado também nas fases iniciais do melhoramento de uma espécie, em populações puras, em que a SRI é realizada de forma explícita.

Em cana-de-açúcar faz-se o uso dos testes de famílias em experimentos com repetições, mas não são realizadas medições em nível individual. Assim, não é possível a predição dos valores genotípicos individuais dos clones potenciais pelo procedimento BLUP individual. Entretanto, pode-se utilizar o procedimento

BLUPIS (BLUP Individual Simulado) desenvolvido por Resende & Barbosa (2004), o qual é uma aproximação ao BLUP individual e indica quantos indivíduos devem ser selecionados em cada família e submetidos a teste clonal. Esse esquema é utilizado em cana-de-açúcar e forrageiras (capim elefante, braquiária, *Panicum*), onde as parcelas experimentais são colhidas em sua totalidade. É um esquema eficiente pois permite maior acurácia seletiva e, portanto, tende a direcionar apenas indivíduos superiores para os testes clonais. Isso permite conduzir testes clonais menores nas fase inicial dos testes clonais, aumentando a eficiência da seleção já nesta fase. Conseqüentemente permite, então, realizar um menor número de fases de testes clonais, geralmente uma ou duas.

5.2. Seleção Recorrente Recíproca – Modelo Eucalipto

A seleção recorrente recíproca (SRR) é a principal ferramenta para o melhoramento da média de cruzamentos interpopulacionais. Assim, deve ser utilizada no melhoramento de espécies em que a heterose é relevante nos caracteres de importância econômica. De maneira geral, todos os programas de melhoramento que adotam a SRR tem obtido sucesso. A SRR foi proposta para o melhoramento vegetal e animal por Comstock et al (1949). Desde então tem sido aplicada ao melhoramento do milho (Paterniani & Campos, 1999, pág. 449-450), aves (Heisdorf, 1969, Bell, 1972) e suínos (Bell, 1972) com resultados excelentes. O método tem sido aplicado (igualmente com resultados excelentes) também em outras espécies de plantas, mas não em muitas, devido à necessidade de polinizações controladas e ao longo ciclo seletivo.

Em dendê a escolha da SRR como o esquema ideal de melhoramento foi definida na década de 1950, logo após a proposição original de Comstock et al. (1949). Meunier & Gascon (1972) descrevem o esquema empregado. O primeiro ciclo de seleção foi completado na Costa do Marfim e em Camarões e o segundo ciclo foi conduzido na Costa do Marfim e na Indonésia. O terceiro ciclo encontra-se em desenvolvimento. Os resultados foram apresentados por Gascon et al. (1988) e Cochard et al. (1993). O ganho genético obtido para produtividade foi de 18% no

primeiro ciclo de seleção e aproximadamente a mesma taxa no segundo ciclo. O ganho genético médio realizado foi de 24% em um período de 15 anos. O esquema utilizado usa progênies S_1 para recombinação, tal qual o método original. O esquema de SRR adotado no Brasil pela Embrapa em conjunto com o CIRAD da França (atuando na Costa do Marfim) é apresentado por Barcelos et al. (2000). A estratégia prevê a infusão de novos materiais genéticos para recombinação em cada população, após teste dos mesmos em cruzamento com a população recíproca.

Em café robusta a SRR foi iniciada em 1984 na Costa do Marfim (Leroy et al., 1993; 1994). O primeiro ciclo foi encerrado, tendo-se obtido um ganho genético de 60% para produtividade (Leroy et al., 1997). O segundo ciclo de seleção encontra-se em andamento. Em café arábica tem sido observada também a presença de heterose (Cilas et al., 1998). Assim, com o futuro domínio da técnica de propagação vegetativa, a SRR deve ser utilizada também em café arábica, em substituição aos métodos atualmente empregados, os quais são adequados ao melhoramento de plantas autógamas propagadas por sementes.

Em eucalipto, Resende & Higa (1990) propuseram um esquema de SRR no contexto da estratégia (c) apresentada no tópico 3. O esquema prevê também a utilização dos melhores indivíduos híbridos selecionados no contexto da SRR, na formação de compostos ou sintéticos, conforme a estratégia (b) do tópico 3. Atualmente vários programas de SRR existem no Brasil para o melhoramento do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*. Entretanto, não existem ainda resultados publicados desses programas. No âmbito mundial, o primeiro programa de SRR em eucalipto foi implementado pelos franceses no Congo (Vigneron, 1992). Tal programa culminou, no primeiro ciclo de SRR envolvendo *E. grandis* x *E. urophylla*, com a obtenção de cinco cultivares clonais híbridos que propiciaram um ganho genético realizado de 75% (Baudouin et al., 1997). Outro programa de SRR com *E. grandis* x *E. urophylla* vem sendo conduzido na África do Sul (Retief & Stanger, 2004). Programas de SRR encontram-se em andamento também em côco e cacau, mas ainda sem resultados publicados (Baudouin et al., 1997).

Várias opções existem para a SRR, as quais são relatadas na sequência.

(A) Seleção Recorrente Recíproca de Genitores: SRR-G

É a seleção recorrente recíproca adaptada a espécies perenes, conforme Resende & Higa (1990). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e recombinação dos próprios genitores antes de gerar a nova população experimental híbrida. É, portanto, um processo retrospectivo.

(B) Seleção Recorrente Recíproca com S₁: SRR-S₁

É a seleção recorrente recíproca original de Comstock et al. (1949). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e recombinação dos S₁ (obtidos simultaneamente aos híbridos) associados aos genitores, antes de gerar a nova população experimental híbrida.

(C) Seleção Recorrente Recíproca com Meios Irmãos: SRR-MI ou SRR-S₀

É a seleção recorrente recíproca proposta por Paterniani & Vencovsky (1978). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e recombinação dos MI ou S₀ intrapopulacionais (obtidos simultaneamente aos híbridos) associados aos genitores, antes de gerar a nova população experimental híbrida. Os indivíduos S₀ intrapopulacionais podem também advir de progênies de irmãos germanos obtidas sob cruzamentos dialélicos ou fatoriais.

(D) Seleção Recorrente Recíproca de Genitores com Híbridos Intermediários: SRR-G-HI

Este esquema foi relatado por Resende & Higa (1990) e é uma modificação do processo descrito em (A). Baseia-se na seleção dos

genitores com base na progênie híbrida seguida por novo direcionamento (via cruzamento dos genitores com maior capacidade geral de combinação com a população recíproca) dos cruzamentos para gerar uma nova população experimental híbrida simultaneamente à recombinação dos genitores. É, portanto, um processo que permite gerar híbridos superiores antes que se complete o ciclo da SRR. Estes são denominados híbridos intermediários (HI) entre o ciclo 0 e o ciclo 1 da SRR. Após a identificação do par de máximo valor em cruzamento, tal par pode ser submetido a um processo de seleção recorrente recíproca individual (SRRI) ou SRR dentro de cruzamento, conforme descrito no item (I). Assim, este esquema é um direcionador para a SRRI.

(E) Seleção Recorrente Recíproca com S1 e Híbridos Intermediários: SRR-S1-HI

É um melhoramento do processo descrito em (B). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e recombinação dos S1 (obtidos simultaneamente aos híbridos) associados aos genitores e simultâneo (processo progressivo) cruzamento entre S1 em nível interpopulacional para gerar os híbridos intermediários. Por este processo, como em (D), híbridos são gerados a cada geração e não apenas a cada duas gerações como nos processos descritos em (A), (B) e (C).

(F) Seleção Recorrente Recíproca com Meios Irmãos ou S0 e Híbridos Intermediários: SRR-MI-HI

É um melhoramento do processo descrito em (C). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e recombinação dos MI ou S0 intrapopulacionais (obtidos simultaneamente aos híbridos) associados aos genitores e simultâneo (processo progressivo) cruzamento entre S0 em nível interpopulacional para gerar os híbridos intermediários.

Por este processo híbridos são gerados a cada geração e não apenas a cada duas gerações como nos processos descritos em (A), (B) e (C).

(G) Seleção Recorrente Recíproca com Meios Irmãos e Híbridos Intermediários usando Genitores: SRR-MI-HIG

É uma modificação do procedimento descrito em (F), em que os híbridos intermediários são obtidos cruzando-se os genitores originais como em (D) e não os seus descendentes como em (F). Pode ser mais eficiente que (F) em termos dos híbridos intermediários pois usam-se os próprios genitores e não os seus filhos oriundos de pais desconhecidos.

(H) Seleção Recorrente Recíproca com Linhagens: SRR-LI

Este esquema foi proposto para o melhoramento do milho por Hallauer (1967) e Lonquist & Williams (1967) e tem sido denominado método dos híbridos crípticos. Em plantas perenes é uma modificação do processo descrito em (E). Baseia-se na seleção dos genitores com base na progênie híbrida e cruzamento entre S1 em nível interpopulacional para gerar a nova população experimental híbrida. Não há recombinação dos S1 e de maneira geral. Há apenas os cruzamentos desses em nível interpopulacional e autofecundação para obtenção de progênies S2. Por este processo, híbridos são gerados a cada geração e sempre advirão de materiais com progressivo grau de endogamia. O final culmina com a seleção de híbridos de linhagens, os quais podem ser propagados via sementes. Há uma certa similaridade deste processo com o componente híbrido intermediário seguido pela seleção recorrente recíproca individual, porém sem o melhoramento contínuo dos híbridos ao longo prazo.

Neste caso, a progênie S₁ é considerada como o genitor já recombinado e o ciclo seletivo é encurtado. Em outras palavras, o teste dos

genitores em cruzamento e o plantio das sementes recombinadas são realizados simultaneamente. Então, no momento em que se identifica os melhores genitores em cruzamentos pode-se imediatamente identificar o melhor indivíduo dentro da progênie S_1 e cruzá-lo para início do segundo ciclo de seleção. Genitores favoráveis ao esquema SRR-LI são aqueles que apresentam baixa depressão por endogamia, pois serão usadas sementes obtidas de linhagens, para os plantios comerciais. Uma forma de avaliar isto é através da comparação entre progênie S_0 (meios irmãos) e progênie S_1 do mesmo genitor ou entre o genitor e sua progênie S_1 .

(I) Seleção Recorrente Recíproca Individual: SRRI

Os processos descritos de (A) a (H) referem-se a processos de seleção recorrente recíproca populacional pois envolvem simultaneamente vários indivíduos de cada população. O processo descrito neste item refere-se a SRRI visto que a seleção interpopulacional envolve inicialmente apenas um indivíduo de cada população e visa explorar o limite máximo da capacidade específica de combinação (CEC). Qualquer dos oito esquemas descritos de (A) até (H) podem ser aplicados dentro da SRRI. A escolha da SRRI é recomendada quando existe um cruzamento (identificado nos estágios iniciais da SRR ou via cruzamentos entre clones elites) muito superior a todos os demais.

Uma comparação entre os oito esquemas de SRR é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre oito esquemas de SRR por meio de vários critérios.

Item	Método	Uso Var. Genética	Seleção Dentro Genitor	Número Gerações p/ Híbrido	Num. Tipos Prog.	Melhoramento Contínuo	Híbridos em cada Geração.
(A)	SRR-G	(1/4) Vai	Não	2	1 e 2**	Sim	Não
(B)	SRR-S1	(1/4) Vai	Sim, 2 Sex	2	3 e 2	Sim	Não
(C)	SRR-MI	(1/8) Vai	Sim, 1 Sex	2	3 e 2	Sim	Não
(D)	SRR-G-HI	(1/4) Vai	Não	1	1 e 3	Sim	Sim
(E)	SRR-S1-HI	(1/4) Vai	Sim, 2 Sex	1	3	Sim	Sim
(F)	SRR-MI-HI	(1/8) Vai	Sim, 1 Sex	1	3	Sim	Sim
(G)	SRR-MI-HIG	(1/8) Vai	Sim, 1 e 2*	1	3	Sim	Sim
(H)	SRR-LI	(1/4)Vai + (1/4) Vdi	Sim, 2 Sex	1	3	Parcial***	Sim

* 1 para a SRR e 2 para os híbridos intermediários (HI); ** alternam 1 e 2 tipos de progênie avaliadas em cada geração; *** Parcial, pois cada ciclo seletivo não se completa plenamente, visto que não há recombinação propriamente dita; Vai: variância genética aditiva interpopulacional associada a uma das populações; Vdi: variância genética de dominância interpopulacional.

Verifica-se pela Tabela 1 que os melhores esquemas são o (A), (B), (D) e (E) pois exploram maior quantidade de variância genética aditiva interpopulacional ((1/4) Vai) em cada ciclo seletivo. Todos esses (e os demais também) completam o ciclo seletivo a cada 2 gerações. No entanto, apenas os esquemas (D) e (E) geram híbridos a cada geração. E também direcionam pares excepcionais para a SRR. O método (E) permite adicionalmente a seleção dentro de genitores, nos dois sexos, tanto para a recombinação quanto para a obtenção dos híbridos intermediários. Assim, este (SRR-S1-HI) deve ser a opção de escolha, considerando o ganho genético por ciclo de seleção. Adicionalmente, o uso de progênies S1 permite a “limpeza” dentro de clone em termos de alelos desfavoráveis, por meio da seleção dentro de progênies. No entanto, a SRR-S1-HI necessita avaliar 3 tipos de progênies em cada geração: os híbridos e as progênies intrapopulacionais nas duas populações. O esquema (D) alterna a avaliação de 1 e 3 tipos de progênie em cada geração, o esquema (A) alterna 1 e 2 e o esquema (B) alterna 3 e 2 tipos de progênie. Finalmente, é importante relatar

que o esquema SRR-LI só será relevante se o objetivo for o plantio de híbridos homogêneos via sementes.

No melhoramento do eucalipto, o esquema (E) pode demandar maior comprimento do ciclo seletivo, se houver necessidade de clonar os indivíduos S1 visando a recombinação via cruzamentos em pomar de hibridação ao invés de recombiná-los no próprio experimento de avaliação dos S1. Neste caso, o ganho genético por unidade de tempo será maior para o esquema (D) e não para o (E).

Os melhores clones obtidos dentro dos híbridos intermediários nos esquemas (D) ou (E) deverão participar na formação de uma população sintética. Por ocasião da avaliação dos híbridos intermediários, outros híbridos gerados a partir do cruzamento entre clones elites deverão ser avaliados conjuntamente. Isto permitirá verificar se o par a ser submetido a SRRI advirá do esquema de SRR ou do cruzamento entre clones elites.

Em resumo, na definição da estratégia ideal de melhoramento, deve-se inicialmente definir o esquema de SRR a ser empregado. Durante o processo de SRR, deve-se definir, se for o caso, o par ideal para SRRI. Estes advirão dos híbridos intermediários, dos cruzamentos da SRR ou dos híbridos advindos dos cruzamentos entre clones elites. Da SRRI pode-se partir para a SRR-LI com apenas um cruzamento elite por geração de endogamia (S1, S2, S3,...).

Em eucalipto cultivado em áreas tropicais, as três estratégias de melhoramento mais usuais são a SRR, a SRIPS e a SRRI. Um programa de melhoramento bem delineado deve ser capaz de concatenar essas três estratégias simultaneamente, visto que cada uma tende a gerar material genético que será direcionado para outra estratégia. Assim, tanto a SRR quanto a SRIPS direcionam pares superiores para a SRRI e esta, juntamente com a SRR direcionam materiais a entrarem em um programa de SRIPS.

6. Métodos Ótimos de Seleção

No melhoramento de plantas perenes a seleção pode ser praticada com os seguintes objetivos: (i) seleção de genitores para cruzamento e recombinação em

programas de SRI e SRR; (ii) seleção de clones para recomendação visando plantios comerciais; (iii) seleção de clones potenciais nas progênes híbridas; (iv) seleção de genitores potenciais em programas de SRI e SRR; (v) seleção de famílias (ou cruzamentos) para direcionar a seleção de clones potenciais ou para plantios comerciais via sementes ou via clonagem.

Para todos esses objetivos, o procedimento ótimo de seleção é o BLUP para os efeitos genéticos aditivos (a), de dominância (d) e genotípicos (g), dependendo da situação. O BLUP é o procedimento que maximiza a acurácia seletiva e, portanto, é superior a qualquer outro índice de seleção combinada, exceto aquele que usa todos os efeitos aleatórios do modelo estatístico (índice multiefeitos, conforme Resende & Higa, 1994), o qual é o próprio BLUP no caso balanceado (Resende & Fernandes, 1999). O BLUP permite também o uso simultâneo de várias fontes de informação tais quais aquelas advindas de vários experimentos instalados em um ou vários locais. Para aplicação do BLUP são necessárias estimativas de componentes de variância e de parâmetros genéticos como a herdabilidade.

O procedimento ótimo de estimação desses componentes de variância é o de máxima verossimilhança residual ou restrita (REML), o qual é superior ao método da análise de variância (ANOVA) em situação de dados desbalanceados e delineamentos não ortogonais (como os blocos aumentados e alguns blocos incompletos). O procedimento ótimo de avaliação genética é, então, o REML/BLUP. Detalhes sobre o REML/BLUP no melhoramento de plantas perenes são apresentados por Resende (2000, 2002a e b, 2004).

7. Delineamentos Experimentais e Tamanho de Parcela

Um delineamento experimental adequado deve obedecer aos princípios fundamentais da experimentação: repetição, casualização e controle local. A importância do número de repetições é capital, significando que, com baixo número de repetições, até a casualização é prejudicada ou comprometida. Como controle local deve ser enfatizada a homogeneidade dentro de estratos ou blocos,

sendo, em princípio, recomendados os delineamentos em blocos casualizados e látice. A casualização e a repetição é que propiciam uma comparação não viciada dos tratamentos, ao passo que o controle local e a repetição permitem reduzir o erro experimental médio. Um erro experimental menor permite inferir como significativa uma diferença real pequena entre médias de tratamentos ou entre valores genéticos.

A tecnologia de seleção atualmente disponível baseia-se no valor genético predito, o qual é obtido após rigorosa correção para todos os efeitos ambientais. Assim, ocorre ajuste para a variação físico-química do solo, por meio do ajuste para os efeitos de blocos. Vários estudos realizados confirmam a maior eficiência dos delineamentos com uma planta ou observação por parcela em relação aqueles com várias plantas por parcela. Esta superioridade advém de:

- (a) maior acurácia seletiva devido ao aumento do número de repetições.
- (b) maior herdabilidade individual no bloco devido a obtenção de blocos mais homogêneos.
- (c) atenuação dos efeitos de competição devido a ocorrência de maior número (8) de vizinhos.
- (d) menor superestimativa (devido à interação $g \times e$) da herdabilidade e do ganho genético em um local, pois são utilizados maior número de repetições (que podem representar diferentes ambientes).

Em termos práticos as vantagens do delineamento com uma observação por parcela são:

- (e) permite conciliar testes com os objetivos de melhoramento e de conservação genética.
- (f) permite uma maior pressão e eficiência de seleção dentro de famílias em algumas espécies.
- (g) evita a ocorrência de endogamia (devido a cruzamento entre irmãos na parcela)
na população selecionada.

- (h) permite a eficiente produção de sementes em pomares de sementes por mudas, o que é especialmente vantajoso para palmáceas, as quais não permitem a propagação vegetativa para a formação de pomares clonais.
- (i) em função do exposto, permite conciliar 3 diferentes objetivos: melhoramento genético, conservação genética e produção de sementes melhoradas.
- (j) menor tamanho e maior homogeneidade do bloco, reduzindo a necessidade de análise espacial de experimentos, pois o controle local é mais efetivo.

Como comprovação prática, tem sido empregado no melhoramento florestal em várias partes do mundo. No Brasil, é usado por exemplo em algumas empresas de celulose, em testes clonais e de progênies, onde constatou-se: aumento da herdabilidade, aumento da acurácia seletiva, ausência de efeitos de competição. Outra comprovação prática foi propiciada por Jansson et al. (1998) que comparou a seleção baseada em parcelas com uma planta com aquela baseada em parcelas quadradas com 36 plantas, avaliando-se as 16 plantas centrais. A correspondência entre as duas seleções de progênies foi acima de 80%, comprovando a eficiência do delineamento com uma planta por parcela.

(8) Delineamentos de Cruzamento para a SRR e a SRIPS

Os delineamentos de cruzamento para a implementação de programas de seleção recorrente recíproca (SSR) visando o melhoramento contínuo do híbrido através dos ciclos seletivos bem como as seleções imediatas dos clones superiores devem ser analisados sob quatro aspectos: (i) eficiência na avaliação da capacidade geral de hibridação dos genitores; (ii) possibilidade de identificação de cruzamentos superiores (seleção de famílias de irmãos germanos); (iii) eficiência da seleção de clones na população híbrida; (iv) capacidade de avaliação de um grande número de genitores, fato que é favorável em termos de intensidade de seleção e tamanho efetivo populacional (N_e) e, portanto, em termos de ganho genético acumulado com as gerações de seleção.

Dentre os delineamentos adequados citam-se o de policruzamento (progênies de meios irmãos interpopulacionais), o de pares simples (progênies de irmãos germanos interpopulacionais), o fatorial desconexo (progênies de meios irmãos e de irmãos germanos interpopulacionais) e o dialélico parcial circulante de Kempthorne & Curnow (1961), que também gera progênies de meios irmãos e de irmãos germanos interpopulacionais simultaneamente. Para pleno atendimento do requisito (i), o melhor delineamento é o de policruzamento, o qual maximiza o ganho com a SRR. Para atendimento do requisito (ii), os delineamentos de pares simples, fatorial desconexo e dialélico parcial circulante são adequados. Quanto ao requisito (iii), os delineamentos fatorial desconexo e dialélico parcial circulante são equivalentes e superiores aos demais (resultados apresentados na seqüência). Por sua vez, a capacidade de avaliação de um grande número de genitores deve ser analisada fixando-se um número total máximo de cruzamentos passíveis de serem avaliados a campo.

A título de exemplo, fixando-se o número total de cruzamentos (ou progênies) a ser avaliado a campo em 400 e, considerando-se quatro cruzamentos por genitor no fatorial desconexo e no dialélico parcial circulante, tem-se os seguintes números de genitores utilizados em cada uma das populações sob SRR: 400 para pares simples, 200 para o policruzamento e 100 para o fatorial desconexo e dialélico parcial circulante. Considerando a recombinação dos 30 melhores genitores, verifica-se que as intensidades de seleção pelo fatorial desconexo e dialélico parcial circulante seriam mais baixas. Considerando três cruzamentos por genitor nesses dois delineamentos, o número de genitores usados sobe para 133, fato que aumenta o N_e e a intensidade de seleção.

Verifica-se que nenhum dos delineamentos atende satisfatoriamente os quatro requisitos: o delineamento de pares simples atende bem aos requisitos (ii) e (iv); os delineamentos fatorial desconexo e dialélico parcial circulante com três cruzamentos por genitor atendem bem aos requisitos (ii), (iii) e (iv); o delineamento de policruzamento atende bem ao requisito (i). Assim, uma comparação mais detalhada é necessária quanto ao fator (i), conforme realizado a seguir.

A eficiência na predição da capacidade geral de hibridação dos genitores pode ser avaliada tomando-se como referência o delineamento de policruzamento, o qual propicia a eficiência máxima. A seguir (Tabela 2) é estudada a eficiência do delineamento fatorial desconexo, quanto ao requisito em questão. Os resultados são igualmente válidos para o dialélico parcial circulante.

As eficiências para diferentes números de cruzamentos por genitor são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Eficiências relativas dos delineamentos fatorial desconexo e dialélico parcial circulante sobre o policruzamento, em função de diferentes números (c) de cruzamento por genitor.

c	E_{f_1}	E_{f_2}
1	0,40	0,63
2	0,80	0,89
3	0,86	0,93
4	0,89	0,94
5	0,91	0,95
6	0,92	0,96
7	0,93	0,96
8	0,94	0,97
9	0,95	0,97
10	0,95	0,97
15	0,97	0,98
20	0,98	0,99
30	0,98	0,99
50	0,99	0,99
100	0,995	0,997

E_{f_1} e E_{f_2} : eficiência em termos de herdabilidade e acurácia, respectivamente.

Verifica-se que, em termos de acurácia, o uso de apenas um cruzamento por genitor (delineamento em pares simples) é 37% menos eficiente que o policruzamento. O uso de três e quatro cruzamentos por genitor reduz a 7% e 6% a perda em eficiência, respectivamente. Assim, três cruzamentos por genitor é adequado. Três cruzamentos por genitor maximiza também a eficiência da seleção de clones na população híbrida. Este é o número empregado em várias indústrias de celulose.

(9) Seleção Precoce

Os principais fatores que ditam o sucesso de um programa de melhoramento são: (i) estratégia adequada de melhoramento (método de seleção recorrente e delineamento de cruzamento); (ii) eficiência no processo seletivo (método de seleção); (iii) curtas gerações de melhoramento.

Os melhoristas de plantas perenes necessitam encurtar os ciclos seletivos e ter maior agressividade no lançamento de cultivares. Acumular dados experimentais na mesma geração pouco impacta o melhoramento de plantas perenes. A perspectiva é de que ciclos mais curtos serão necessários principalmente nos programas de melhoramento desenvolvidos por instituições públicas. A velocidade de troca de cultivares melhorados é um fator essencial na competitividade do agronegócio. As ferramentas precisas de seleção atualmente disponíveis (REML/BLUP) permitem a adoção segura da seleção precoce. O encurtamento das gerações de seleção maximiza o ganho por unidade de tempo. Nesse sentido, é de consenso que a seleção em eucalipto não deve ultrapassar a idade de três anos. Isto vem sendo praticado por várias indústrias de celulose. Também em fruteiras e outras espécies perenes geralmente não é necessário mais que três anos ou safras de avaliação. Em culturas de propagação assexuada é importante se ter uma alta rotatividade de clones em plantios comerciais, visando reduzir a vulnerabilidade dos plantios aos ataques de novas pragas e doenças. Gerações curtas de melhoramento facilitam isso.

10. Contribuições do Melhoramento e Perspectivas

Progressos espetaculares empregando-se o melhoramento clássico tem sido relatados para as culturas do eucalipto, dendê e café robusta (ver ítem 5.2). Para o cacau, Dias (2001) também relata ganhos consideráveis.

Em cana-de-açúcar o impacto da tecnologia “cultivar” sobre a produtividade ao longo do século XX tem sido marcante. No início daquele século houve redução de 90% na produção de açúcar no estado de São Paulo em menos de cinco anos, em decorrência da ação do vírus do mosaico sobre os cultivares primitivos. Logo os programas de melhoramento existentes naquela época introduziram os primeiros clones híbridos interespecíficos que foram gerados por um processo denominado nobilização. Tais híbridos reavivaram a cultura da cana. Nos últimos 25 anos, para os estados de São Paulo e Minas Gerais respectivamente, verificaram-se incrementos de 0,64 e 1,34 toneladas de cana/ha/ano e 1,79 e 1,25 kg de açúcar/tonelada de cana/ano. Obviamente, esses ganhos são decorrentes do emprego de tecnologia tanto na área agrícola como na industrial. Neste cenário, os cultivares ocupam reconhecidamente posição de destaque, embora seja difícil quantificar a contribuição de cada fator de produção para o avanço global.

O censo de cultivares empregados atualmente no Brasil reflete também a expressiva contribuição dos programas de melhoramento da cana-de-açúcar no país. Antes do Brasil implantar o PROÁLCOOL os produtores de cana-de-açúcar empregavam apenas duas ou três cultivares para a produção de açúcar. Nos dias de hoje, cada empresa sucroalcooleira emprega em sua lavoura mais de dez cultivares, além de outras dezenas em constante avaliação em experimentos com repetição e talhões semi-comerciais, com vistas a substituir aquelas em uso atual. O manejo de cultivares tem proporcionado captalizar a interação genótipo x ambiente por meio da correta alocação dos cultivares nos diferentes ambientes de produção, contribuindo para maximizar a produtividade agrícola.

Em eucalipto no Brasil, a produtividade média de madeira por hectare cresceu de 20m³/ha/ano em 1960 para 40 m³/ha/ano em 2000, sendo que 50% desse ganho pode ser creditado ao melhoramento genético. Isto equivale a um ganho genético de 1,25% por ano.

Na Tabela 3 são apresentados dados de produtividade (Kg/ha) e ganhos de produtividade para algumas das principais culturas perenes e anuais cultivadas no Brasil, no período de 1990/1991 e 2002/2003.

Tabela 3. Produtividade (Kg/ha, exceto abacaxi e coco em frutos/ha) e ganhos de produtividade para algumas das principais culturas perenes e anuais cultivadas no Brasil, no período de 1990/1991 e 2002/2003.

Culturas	Produtividade (1990+1991)/2	Produtividade (2002+2003)/2	Ganho em 11 anos (%)	Ganho Anual (%)
Perenes				
Abacate	10680,18	14858,63	39,12	3,56
Banana	11514,61	13057,27	13,40	1,22
Borracha (látex)	903,36	1507,44	66,87	6,08
Cacau(amêndoa)	508,20	293,93	-42,16	-3,83
Café (em côco)	1053,74	973,53	-7,61	-0,69
Cana-de-açúcar	61716,66	72586,85	17,61	1,60
Castanha de caju	236,61	257,85	8,97	0,82
Côco-da-baía	3555,18	7026,62	97,64	8,88
Dendê (côco)	7475,79	9798,31	31,07	2,82
Goiaba	26320,47	19511,61	-25,87	-2,35
Guaraná	231,82	314,84	35,81	3,26
Laranja	15378,40	21296,23	38,48	3,50
Maçã	16833,98	26949,81	60,09	5,46
Mamão	32431,29	46076,66	42,07	3,82
Manga	10509,26	13104,76	24,70	2,25
Maracujá	15545,92	13816,18	-11,13	-1,01
Pêra	8587,21	10804,40	25,82	2,35
Pêssego	6605,20	9092,72	37,66	3,42
Uva	12359,15	16461,65	33,19	3,02

Anuais				
Abacaxi	22145,17	24140,31	9,01	0,82
Algodão herbáceo	1327,36	2967,43	123,56	11,23
Arroz (em casca)	2091,16	3286,53	57,16	5,20
Batata – inglesa	14067,40	19873,15	41,27	3,75
Feijão (em grão)	491,29	773,64	57,47	5,22
Mandioca	12584,64	13605,94	8,12	0,74
Milho (em grão)	1840,97	3392,61	84,28	7,66
Soja (em grão)	1642,74	2688,36	63,65	5,79
Tomate	37826,74	58425,29	54,45	4,95
Trigo (em grão)	1288,59	1939,47	50,51	4,59

Os valores da Tabela 3 foram calculados a partir de dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura. Para calcular os ganhos de produtividade foram obtidas as médias de produtividade de dois anos consecutivos, como forma de eliminar o efeito de sazonalidade de produção em algumas culturas, como por exemplo o café, onde se tem ciclos bianuais de maior produção. É importante relatar que os ganhos relatados são fenotípicos e não apenas devidos ao melhoramento genético. Podem ser atribuídos, em parte, também ao melhoramento ambiental e das técnicas de cultivo. Mesmo assim, tais ganhos são úteis em mostrar os resultados dos programas convencionais de melhoramento genético.

Para as culturas perenes verifica-se que o ganho médio anual esteve por volta de 1% a cerca de 3% para a maioria das espécies. Casos fora desse intervalo podem ser observados para as culturas da maçã (5,46%), coco (8,88%) e seringueira (6,08%). Estes maiores ganhos podem ser atribuídos à maior eficiência do melhoramento nessas espécies ou à mudança do cultivo para regiões mais favoráveis (provavelmente isto ocorreu com a seringueira). Outros casos atípicos são aqueles em que praticamente houve estagnação da produtividade (casos do café e maracujá, em que os ganhos anuais estiveram próximos de zero) e aqueles em que houve decréscimo de produtividade (casos

do cacau e da goiaba). No caso do cacau, o decréscimo pode ser explicado pelos efeitos da doença vassoura de bruxa em materiais genéticos susceptíveis.

Analisando as culturas anuais para efeito comparativo, verifica-se que os ganhos anuais foram cerca de 5% para o arroz, o feijão, o tomate e o trigo. Para as culturas mais intensamente trabalhadas pela iniciativa privada, os ganhos foram superiores: cerca de 6% para a soja, 8% para o milho e 11% para o algodão (no caso do algodão houve expansão da cultura para regiões mais apropriadas ao seu cultivo, fato que pode explicar o elevado ganho de produtividade). Os maiores ganhos (5% a 11%) verificados para as culturas anuais em relação àqueles (1% a 3%) verificados pelas culturas perenes podem ser explicados pelo maior número de ciclos seletivos realizado nas primeiras, no período de 11 anos considerado.

Os ganhos de produtividade apresentados confirmam a eficiência do melhoramento genético clássico ou convencional. O melhoramento de plantas perenes seguirá dependendo fortemente do melhoramento clássico. Em algumas espécies, novos caracteres passarão a ser enfocados pelo melhoramento, tais como aqueles de qualidade da madeira em espécies florestais e qualidade da matéria prima (teor de amido e ácidos orgânicos, além do açúcar) da cana-de-açúcar, especialmente importante para colheita mecanizada sem despalha prévia a fogo (isso porque metade da área colhida mecanicamente hoje no Brasil ainda se faz uso de fogo visando eliminar material verde que contem amido e ácidos orgânicos indesejáveis no branqueamento do açúcar e processo fermentativo para álcool). Em muitas espécies se passará a utilizar a heterose e, portanto, alterações nas metodologias e estratégias de melhoramento serão necessárias. Como exemplo cita-se o café arábica, em que o domínio da clonagem em escala comercial permitirá explorar a heterose e deverá mudar (para a SRR) drasticamente os métodos de melhoramento que hoje são típicos de espécies autógamas (cruzamento entre linhagens e seleção pelos métodos do bulk e pedigree). O domínio da clonagem em palmáceas também causará impacto nas estratégias de melhoramento em várias espécies em que hoje pratica-se a SRI.

Seleção para novos sistemas de produção serão também necessários. Por exemplo, a seleção de materiais para cultivos mais adensados em café, cacau e

dendê poderá ser realizada de forma eficiente por meio do emprego de modelos de competição genotípica no contexto dos modelos de avaliação genética.

Novas espécies utilizadas como fonte de novos produtos passarão a ser melhoradas. Dentre essas, estarão plantas medicinais e espécies arbóreas madeireiras e frutíferas de uso múltiplo as quais são muito importantes no desenvolvimento rural sustentado em regiões mais pobres e com menor qualidade de vida (África e América tropical e semi-árida). Nessas regiões tais espécies são relevantes como fatores mitigadores da fome e, portanto, precisam receber a atenção dos melhoristas. Nesse caso, os métodos de melhoramento serão aqueles tradicionalmente empregados concomitantemente ao processo de domesticação e deverão ter também uma natureza participativa.

Espera-se também contribuições dos vários projetos genômicos que estão sendo desenvolvidos em várias espécies perenes como o eucalipto, a cana-de-açúcar, a laranja, o caju. Os resultados de tais projetos tem aumentado significativamente o nível de compreensão dos mecanismos genéticos associados ao controle de alguns caracteres.

11. Referências Bibliográficas

BARBOSA; MHP (2000) Perspectivas para o melhoramento da cana-de-açúcar. In: Raposo FV, Lambert ES, Alves GF, Mendonça HA, Faria MV, Gomes MS (eds) **Anais do IV Simpósio de Atualização e Melhoramento de Plantas**. Editora UFLA, Lavras, p 1-17.

BARCELOS, E. ; NUNES, C. D. M.; CUNHA, R. N. V. Melhoramento genético e produção de sementes comerciais de dendezeiro. In: VIEGA, I. J. M.; MULLER, A. A. **A cultura do dendezeiro na Amazônia Brasileira**. Belém: Embrapa, 2000. p. 145-174.

BAUDOQUIN, L.; BARIL, C.; CLEMENTDEMANGE, A.; LEROY, T.; PAULIN, D. Recurrent selection of tropical tree crops. **Euphytica**, v. 96, n. 1, p. 101-114, 1997.

BELL, A. More on reciprocal recurrent selection. In: National Poultry Breeders Round Table, 21. **Proceedings**. 1972. p.197-206.

BRUCKNER, C. H. Melhoramento de fruteiras. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. da UFV., 1999. p. 679-714.

BRUCKNER, C. H. **Melhoramento de fruteiras tropicais**. Viçosa: Ed. da UFV., 2001.

CILAS, C.; BOUHARMONT, P.; BOCCARA, M.; ESKES, A. B.; BARADAT, P. Prediction of genetic value for coffee production in *Coffea arabica* from a half-diallel with lines and hybrids. **Euphytica**, v. 104, p. 49-59, 1998.

COCHARD, B.; NOIRET, J. M.; BAUDOUIN, L.; AMBLARD, P. Second cycle de sélection récurrente réciproque chez le palmier à huile *Elais guineensis*. Résultat des tests d'hybrides Deli x La Mé. **Oléagineux**, v. 48, n. 11, p. 441-451, 1993.

COMSTOCK, R.E.; ROBINSON, H.F; HARVEY, P.H. A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. **Agronomy Journal**, v. 41, p. 360 – 367, 1949.

DIAS, L. A. S. dos. **Melhoramento genético do cacauero**. Viçosa: FUNAPE, 2001. 578 p.

DIAS, L. A. S. dos; RESENDE, M. D. V. de. Estratégias e metodos de seleção. In: DIAS, L. A. S. dos. (Org.). **Melhoramento genético do cacauero**. Viçosa: FUNAPE, 2001a. p. 217-287.

FERREIRA, R. P.; PEREIRA, A. V. Melhoramento de forrageiras. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. da UFV, 1999. p. 649-677.

GASCON, J.P; LEGUEN, V.; NOUY, B. Résultats déssais de second cycle de sélection récurrent réciproque chez le palmier à huile. **Oléagineux**, v. 43, n.1, p. 1-7, 1988.

HALLAUER, A.R. Development of single-cross hybrids from two-eared maize populations. **Crop Science**, v. 7, p. 192-195, 1967.

HEISDORF, A. Twenty years of experience with reciprocal recurrent selection. In: National Poultry Breeders Round Table, 18. **Proceedings**. 1969. p.112 -155.

JANSSON, G.; DANELL, O.; STENER, L. Correspondence between single-tree and multiple-tree plot genetic tests for production traits in *Pinus sylvestris*. **Canadian Journal of Forestry Research**, v. 28, p. 450-458, 1998.

KEMPTHORNE, O.; CURNOW, R. N. The partial diallel cross. **Biometrics**, v. 17, p. 229-250, 1961.

LEROY T., MONTAGNON C., CILAS C., YAPO A., CHARMETANT P., ESKES A.B. Reciprocal recurrent selection applied to *Coffea canephora* Pierre. III. Genetic gains and results of first cycle intergroup crosses. **Euphytica**, v. 95, p. 347-354, 1997.

LEROY, T.; CHARRIER, A.; ESKES, A.B. Reciprocal recurrent selection applied to *Coffea canephora*, 1.Characterization and evaluation of breeding populations and value of intergroup hybrids. **Euphytica**, v. 67, p. 113-125, 1993.

LEROY, T.; MONTAGNON, C.; CILAS, C.; CHARRIER, A.; ESKES, A.B. Reciprocal recurrent selection applied to *Coffea canephora*, 2. Estimation of genetic parameters. **Euphytica**, v. 74, n. 1-2, p. 121-128, 1994.

LONNQUIST, J.H.; WILLIAMS, N.E. Development of maize hybrids through selection among full-sib families. **Crop Science**, v. 7, p. 369-370, 1967.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. da UFV, 1999. p. 205-251.

MEUNIER, J.; GASCON, J. P. Le schema général d'amélioration du palmier à huile à IRHO. **Oléagineux**, v. 27, p. 1-12, 1972.

PATERNIANI, E.; CAMPOS, M.S. Melhoramento do Milho. In: BORÉM, A. (Ed.) **Melhoramento de Espécies Cultivadas**. Viçosa: Editora UFV. 1999. p. 429 – 485.

PATERNIANI, E.; VENCOSKY,R. Reciprocal recurrent selection based on half sib progenies and prolific plants in maize. **Maydica**, v. 23, p. 209-219, 1978.

PEREIRA, Antonio Vander ; VALLE, C. B. DO ; FERREIRA, R. P. ; MILES, John W . Melhoramento de forrageiras tropicais. In: Nass, L.L.; Valois, A.C.C; Melo, I.S.de; Inglis-Valadares, M.C.. (Org.). In: Recursos Genéticos & Melhoramento - Plantas. Cuiabá, 2001, v. 1, p. 549-601.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A.F.B.; SANTOS, J.B. (2001) Melhoramento de espécies alógamas. In: Nass, LL, Valois, ACC, Melo, IS and Valadares-Inglis, MC

(eds) Recursos genéticos e melhoramento de plantas. Fundação MT, Rondonópolis, p 201-230.

RESENDE, M. D. V. de. ; BARBOSA, M.H.P. Selection via simulated individual Blup (Blupis) based on family genotypic effects in sugarcane. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, 2004. (submetido).

RESENDE, M. D. V. de. ; BARBOSA, M.H.P. ***Estratégias ótimas para o melhoramento de plantas com reprodução assexuada***. Embrapa Florestas. 2005. 85 p. (Documentos).

RESENDE, M. D. V. de. ***Melhoramento de Essências Florestais***. In: BORÉM, A. Melhoramento de Espécies Cultivadas. Viçosa: Editora UFV, 1999, p.589-647.

RESENDE, M. D. V. de; HIGA, A. R. Estratégias de melhoramento para eucalipto visando a seleção de híbridos. ***Boletim de Pesquisa Florestal***, Colombo, v. 20/21, p. 1-20, 1990.

RESENDE, M. D. V. de; HIGA, A. R. Maximização da eficiência da seleção em testes de progênies de *Eucalyptus* através da utilização de todos os efeitos do modelo matemático. ***Boletim de Pesquisa Florestal***, Colombo, v. 28/29, p. 37-55, 1994.

RESENDE, M.D.V. de; FERNANDES, J.S.C. Individual BLUP procedure for experimental designs applied to forest tree breeding. . ***Brazilian Journal of Mathematics and Statistics***, v.17, p.89-107, 1999.

RESENDE, M.D.V. ***Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes***. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002a. 975p.

RESENDE, M.D.V. ***Métodos Estatísticos Ótimos na Análise de Experimentos de Campo***. Colombo: Embrapa Florestas. 2004. 65 p. (Documentos, 100).

RESENDE, M.D.V. ***Software Selegen-REML/BLUP***. Curitiba: Embrapa Florestas, 2002b. 67p (Documentos 77).

RESENDE, MDV (2001) Melhoramento de espécies perenes. In: Nass, LL, Valois, ACC, Melo, IS and Valadares-Ingliš, MC (eds) Recursos genéticos e melhoramento de plantas. Fundação MT, Rondonópolis, p 357-421.

RESENDE, M.D.V. **Análise Estatística de Modelos Mistos via REML/BLUP no Melhoramento de Plantas Perenes**. Colombo: Embrapa Florestas. 2000. 101 p. (Documentos, 47).

RETIEF, E.C.L.; STANGER, T.K. Early measurements of inter and intraspecific mating designs of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* and its implications for hybrid breeding strategies. In: IUFRO Conference: *Eucalyptus in a changing world*. Aveiro: IUFRO, 2004.

SERA, T. Desafios no melhoramento genético do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE ATUALIZAÇÃO EM GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2., 1998, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 1998. p.105-122.

SIQUEIRA, E. R.; RIBEIRO, F. E.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. Melhoramento genético do coqueiro. In: FERREIRA, J.M.S.; WARWICK, D.R.N.; SIQUEIRA, L.A. **A cultura do coqueiro no Brasil**. Brasília: Embrapa-SPI, 1998. p. 73-98.

VIGNERON, P. Création et amélioration de variétés hybrides d'eucalyptus au Congo. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 234, n. 4, p. 29-42, 1992.

WRICKE, G.; WEBER, W. E. **Quantitative genetics and selection in plant breeding**. Berlin: Walter de Gruyter. 1986. 406 p.