**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Acurácia da seleção simultânea para caracteres de interesse em milho
tropical de segunda safra**

Leandro de Freitas Mendonça

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Genética e
Melhoramento de Plantas

**Piracicaba
2015**

Leandro de Freitas Mendonça
Engenheiro Agrônomo

**Acurácia da seleção simultânea para caracteres de interesse em milho tropical de
segunda safra**

Orientador:
Prof. Dr. **ROBERTO FRITSCHÉ-NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Genética e
Melhoramento de Plantas

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Mendonça, Leandro de Freitas

Acurácia da seleção simultânea para caracteres de interesse em milho tropical de segunda safra / Leandro de Freitas Mendonça. - - Piracicaba, 2015.
71 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Interação genótipo ambiente 2. Modelos lineares mistos 3. Acurácia
4. Herdabilidade I. Título

CDD 633.15
M539a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

*A minha esposa Jéssika pelo carinho,
apoio e compreensão de todos os
dias.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, o grande responsável em minha vida por todas as conquistas.

A minha esposa Jéssika Angelotti Mendonça, que desde o início de minha vida acadêmica esteve ao meu lado oferecendo ajuda, conselho, incentivo e afeto.

A toda minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Em especial meus pais Romilda e Adelino, minhas irmãs Cristiane e Fernanda e meu cunhado Claudemir.

A Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por me conferir recursos técnicos e humanos para uma excelente formação acadêmica. Em especial ao Departamento de Genética.

Ao Laboratório de melhoramento de Plantas Alógamas, pelo grande enriquecimento profissional e pessoal. A todos os amigos que lá conquistei e ao meu orientador Professor Dr. Roberto Fritsche-Neto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de estudos durante o primeiro ano de mestrado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo FAPESP n° 2014/23635-4) pela concessão da bolsa de estudos e reserva técnica.

A todos aqui não mencionados que, de certa forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

"All models are wrong, but some are useful."

George E. P. Box

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 O cultivo do milho de segunda safra	17
1.2 Melhoramento para condições de estresse por nitrogênio	18
1.3 Melhoramento para precocidade e produtividade	21
1.4 Seleção simultânea de caracteres	22
1.5 BLUP <i>single-trait</i> e BLUP <i>multi-trait</i>	24
Referências	24
2 ACURÁCIA DA SELEÇÃO SIMULTÂNEA PARA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE E EFICIÊNCIA NO USO DE NITROGÊNIO EM LINHAGENS DE MILHO TROPICAL	29
Resumo	29
Abstract	29
2.1 Introdução	30
2.2 Desenvolvimento	32
2.2.1 Objetivos	32
2.2.1.1 Objetivo geral	32
2.2.1.2 Objetivos específicos	32
2.2.2 Material e Métodos	32
2.2.2.1 Multiplicação das linhagens de milho tropical	32
2.2.2.2 Instalação e condução dos experimentos no campo	32
2.2.2.3 Caracteres avaliados	33
2.2.2.4 Índices de resposta das plantas ao estresse por nitrogênio	33
2.2.2.5 Análise de deviance e equações de modelos mistos	35
2.2.2.6 Métodos de seleção simultânea	36
2.2.2.6.1 Eficiência agronômica ao baixo nitrogênio	37
2.2.2.6.2 Média Harmônica da Performance Relativa	37
2.2.2.6.3 Índice Aditivo de seleção (IAD)	37
2.2.2.6.4 Índice de Mulamba-Mock (IMM)	38
2.2.2.6.5 Seleção via Análise Gráfica (AGR)	38
2.2.2.7 Comparação dos métodos de seleção simultânea	38
2.2.3 Resultados	39

2.2.3.1 Análise de Deviance e parâmetros dos índices de resposta	39
2.2.3.2 Ganhos com a seleção	41
2.2.4 Discussão.	42
2.2.4.1 O desempenho dos índices per se de seleção EABN e MHPR	42
2.2.4.2 Comparação entre as análises <i>single-trait</i> e <i>multi-trait</i>	44
2.2.4.3 Ranqueamento e seleção diferencial das metodologias	46
2.3 Conclusões	48
Referências	49
3 ACURÁCIA DA SELEÇÃO SIMULTÂNEA PARA PRECOCIDADE E PRODUTIVIDADE EM LINHAGENS DE MILHO TROPICAL	51
Resumo.....	51
Abstract	51
3.1 Introdução	52
3.2 Desenvolvimento	53
3.2.1 Objetivos..	53
3.2.1.1 Objetivo geral.....	53
3.2.1.2 Objetivos específicos	53
3.2.2 Material e métodos.....	54
3.2.2.1 Multiplicação das linhagens de milho tropical	54
3.2.2.2 Instalação e condução dos experimentos no campo.....	54
3.2.2.3 Caracteres avaliados.....	54
3.2.2.4 Análise de deviance e equações de modelos mistos	55
3.2.2.5 Métodos de seleção simultânea.....	56
3.2.2.5.1 Índice Aditivo de seleção (IAD)	57
3.2.2.5.2 Índice de Mulamba-Mock (IMM).....	57
3.2.2.5.3 Seleção via Análise Gráfica (AGR)	58
3.2.2.6 Comparação dos métodos de seleção simultânea	58
3.2.3 Resultados	59
3.2.3.1 Análise de Deviance e parâmetros dos caracteres de seleção	59
3.2.3.2 Ganhos com a seleção	60
3.2.4 Discussão.	62
3.2.4.1 Desempenho e correlação entre os caracteres e métodos de predição dos valores genotípicos	62
3.2.4.2 Comparação entre as metodologias de seleção	66

3.3 Conclusões.....	69
Referências	69
4 CONCLUSÕES GERAIS	71

RESUMO

Acurácia da seleção simultânea para caracteres de interesse em milho tropical de segunda safra

O milho de segunda safra, também conhecido como milho safrinha, é definido como aquele semeado entre os meses de janeiro e março. Esta modalidade de cultivo atingiu no ano agrícola de 2013/2014 uma área plantada de 9,18 milhões de hectares, superior a área cultivada com milho primeira safra, que no mesmo período foi de 6,61 milhões de hectares. Na segunda safra, há alto risco de instabilidades climáticas, principalmente em decorrência de baixas temperaturas, geadas, má distribuição de chuvas e redução do fotoperíodo. Todos estes fatores prejudicam a atividade fotossintética do milho, reduzindo sua produtividade. No entanto, dada a importância deste cultivo, empresas públicas, privadas e universidades vêm buscando incrementar a produtividade e a estabilidade. Para isso, alguns caracteres são especialmente preconizados. Devido ao alto risco de perda por adversidades ambientais, muitos produtores investem pouco em adubação, principalmente adubação nitrogenada. Neste contexto, o desenvolvimento de plantas mais eficientes no uso e, ou, tolerantes ao estresse por nitrogênio, resultaria em maior segurança para o produtor. Não obstante, a precocidade tem elevada importância, já que materiais precoces reduzem o risco de perdas neste período. No entanto, a mesma deve estar sempre associada a alta produtividade. Assim, para a seleção simultânea destes caracteres, pode-se lançar mão de índices *per se* de resposta das plantas ao estresse, análises gráficas e, ou, índices de seleção simultânea. Adicionalmente, os valores genotípicos das linhagens para essas características, além de serem preditos via REML/BLUP *single-trait* (análise univariada), também podem ser preditos via REML/BLUP *multi-trait* (análise multivariada). Dessa forma, os valores genotípicos são corrigidos pela covariância existente entre os caracteres. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio, além de plantas precoces e produtivas. Para isto, linhagens de milho tropical foram cultivadas e avaliadas para estes caracteres. Foram então simulados diversos cenários de seleção simultânea. A partir destes resultados, observou-se que o índice *per se* de resposta das plantas ao estresse Média Harmônica da Performance Relativa (MHPR) foi o mais eficiente na seleção de plantas eficientes no uso e tolerantes ao estresse por nitrogênio. Isto ocorreu devido a forte correlação desfavorável entre os índices que estimam a eficiência e a tolerância, além da superioridade e em acurácia, herdabilidade e ganhos com a seleção deste índice *per se*. Já para a seleção simultânea da produtividade e precocidade, o índice Aditivo de seleção simultânea, utilizando os valores genotípicos preditos via REML/BLUP *single-trait* se mostrou o mais eficiente, já que obteve ganhos satisfatórios em todos os caracteres e há a possibilidade de modular, de forma mais satisfatória, os ganhos em cada caractere. Conclui-se que a seleção simultânea tanto para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio, quanto para produtividade e precocidade são possíveis. Além disso, a escolha do melhor método de seleção simultânea depende da magnitude e do sentido da correlação entre os caracteres.

Palavras-chave: Estresse abiótico; Modelos mistos; Correlação entre caracteres; Ganhos com a seleção; Milho safrinha

ABSTRACT

Accuracy of simultaneous selection for interest traits in second growing season tropical maize

Second growing season maize, also known as winter maize, is the maize sowed in Brazil between January and March. This growing modality reached 9.18 million hectares in 2013/2014, higher than the area cultivated in first growing season that was 6.61 million hectares in the same period. In the second season, there is a high risk of climate instabilities, mainly due to low temperatures, frost, poor rainfall distribution and reduction of photoperiod. All these factors harm photosynthetic activity, reducing the maize yield. However, because of the recent plant area increasing, public, private companies and universities have sought increased yield and stability of the second growing season maize. For this, some traits are mainly in the selection process. With the high risk of yield losses due to environmental adversities, many farmers have done little investment in fertilizers, especially nitrogen fertilization. In this context, the development of plants that are nitrogen use efficient and nitrogen stress tolerant could result in a safer activity for the farmers. In addition, the earliness is highly important, since early materials reduce the risk of losses during this period. However, the earliness must always be associated with a high yield. This way, simultaneous selection of these traits can be made by *per se* responses indexes of stressed plants, graphical analysis and simultaneous selection indexes. Additionally, the genotypic values of the genotypes for the traits can be predicted not only by REML/BLUP single-trait (univariate analysis), but also by REML/BLUP multi-trait (multivariate analysis). In the second, the genotypic values are adjusted considering the covariance between the traits. This way, the objective of this study was to investigate the possibility of simultaneous selection for nitrogen use efficiency and nitrogen stress tolerance, as well as early and high yielding plants. For this, tropical maize lines were grown and evaluate. By these data, it was simulated several simultaneous selection sets. It was observed that Harmonic Mean of the Relative Performance (HMRP) is the most efficient in the selection for nitrogen use efficient and nitrogen stress tolerance. This probably occurs due to the strong unfavorable correlation between the indexes that estimate the efficiency and the tolerance, as well as the superiority in accuracy, heritability and selections gains of HMRP. In case of simultaneous selection for yield and earliness, the additive simultaneous selection index using the genotypic values predicted by REML/BLUP single-trait proved the most efficient selection, because it got satisfactory gains in all the traits and, this index allows the possibility to modulate the gains in each trait. It was concluded that the simultaneous selection for nitrogen use efficiency and nitrogen stress tolerance, as well as for yield and earliness are possible. Furthermore, the choice of the best simultaneous selection method depends on the magnitude and direction of the correlation between the traits.

Keywords: Abiotic stress; Mixed models; Correlation between traits; Selections gains; Winter maize

1 INTRODUÇÃO

1.1 O cultivo do milho de segunda safra

O milho de segunda safra, também conhecido como milho safrinha, pode ser definido como aquele semeado entre os meses de janeiro e março. Esta modalidade de cultivo começou no estado do Paraná no final da década de 1970, quando se buscava uma alternativa ao cultivo de cereais de inverno após a colheita da soja (DUARTE, 2008).

No início da década de 1990 o cultivo do milho de segunda safra iniciou sua expansão, principalmente nos estados do Paraná e São Paulo. Posteriormente, este cultivo ganhou espaço, se estabelecendo por quase toda a região centro-sul do país. No início de sua expansão, as produtividades obtidas eram muito baixas, cerca de 1.800 kg ha^{-1} em média. Os materiais cultivados não tinham adaptabilidade específica para o cultivo nesses meses e por muitas vezes eram utilizadas "sementes de paiol" (F_2 de híbridos cultivados no verão). Sendo assim, "Safrinha" era sinônimo de alto risco e baixa investimento em tecnologia de produção (GERAGE; BIANO, 1990).

Os primeiros trabalhos para o desenvolvimento de genótipos adaptados às condições de cultivo do milho segunda safra foram realizados pelo IAPAR (Instituto Agronômico do Paraná) ainda na década de 1980. O desafio era estudar os efeitos climáticos sobre o desenvolvimento do milho cultivado nesse período. Com o gradual aumento no número de produtores cultivando o milho segunda safra, Universidades, empresas públicas e privadas voltaram os olhos para este mercado, pesquisando e desenvolvendo tecnologias para o mesmo. No início dos anos 2000 o plantio de milho segunda safra teve um grande crescimento, decorrente principalmente do plantio no estado do Mato Grosso, feito por produtores oriundos do Sul do País. Desde então, a produção do milho segunda safra vem crescendo a taxa de 10% ao ano, enquanto o cultivo de primeira safra cresce cerca de 2% ao ano (GALVÃO; TROGELLO; PEREIRA, 2015).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2015), no ano agrícola 2013/2014 foram cultivados em todo o Brasil 9,18 milhões de hectares de milho segunda safra, área muito superior ao milho verão ou milho primeira safra, que foi de 6,61 milhões de hectares. Em termos de produção, o milho segunda safra chegou a marca de 48,2 milhões de toneladas, enquanto o de primeira safra atingiu 31,6 milhões de toneladas, com média de produtividade de 4.800 kg ha^{-1} e 5.200 kg ha^{-1} , respectivamente. Neste contexto, o termo "safrinha" já se torna inapropriado nos dias de hoje para descrever este cultivo.

Mesmo com a obtenção de produtividades satisfatórias, o cultivo do milho de segunda safra ainda apresenta riscos, principalmente em relação à ocorrência de baixas temperaturas, geadas, má distribuição de chuvas e a redução do fotoperíodo, o que é prejudicial para o cultivo do milho (GALVÃO; TROGELLO; PEREIRA, 2015). Adicionalmente, Quiessi et al. (1999), citam que neste período, o milho tende a perder em componentes de produtividade, além da ocorrência do aumento do tempo para florescimento feminino e redução de porte, em comparação com o milho primeira safra. Segundo o autor, isto ocorre já que há uma menor atividade fotossintética da planta, devido à menor temperatura no período.

De forma geral, quanto mais tarde for feito a semeadura, menor o potencial produtivo da cultura. Por este motivo os produtores por vezes investem menos em material genético e adubação nas lavouras cultivadas muito tardiamente. Neste sentido, Duarte (2008) afirma que boa parte do sucesso do milho de segunda safra esta relacionado com o desenvolvimento de materiais precoces e superprecoces pelo melhoramento genético. Já para DoVale et al. (2011) é o alto custo dos insumo, principalmente dos adubos nitrogenados que tem limitado o aumento de produtividade de pequenos produtores do milho de segunda safra.

Com isto, o desenvolvimento de materiais com caracteres favoráveis para o cultivo do milho de segunda safra pode auxiliar os agricultores na obtenção de produtividades satisfatórias e mais estáveis, frente às adversidades climáticas. Isto porque híbridos precoces conseguem concluir seu ciclo de forma mais rápida, ampliando a janela ideal de plantio, reduzindo o tempo de exposição às condições adversas. Já genótipos eficientes no uso de nutrientes trazem maior segurança ao produtor no momento de investir em adubação.

1.2 Melhoramento para condições de estresse por nitrogênio

O melhoramento para condições de estresses nutricionais segue principalmente duas linhas de pesquisa (MAIA et al., 2011): a tolerância a baixa disponibilidade de nutrientes e a eficiência no uso destes. Plantas tolerantes ao estresse por baixa disponibilidade de nitrogênio tendem a ter baixa plasticidade, ou seja, apresentam produtividades satisfatórias em ambientes estressantes. Entretanto, em condições ótimas, sua produtividade é de moderada a baixa (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Por outro lado, genótipos eficientes no uso de nitrogênio apresentam altas produtividades em ambientes favoráveis. No entanto, sua produtividade em estresse sofre reduções significativas.

Na maioria dos casos, os programas de melhoramento têm desenvolvido seus materiais em condições favoráveis de cultivo, visando seleção com base em altas produtividades. Assim, esta prática vem reduzindo a variabilidade genética tanto para a eficiência no uso de

nitrogênio (EUN) quanto para a tolerância ao estresse pela baixa disponibilidade do mesmo (DUVICK; CASSMAN, 1999; WISSUWA et al., 2009). Todavia, diversos trabalhos tem demonstrado que ainda há variabilidade genética para EUN e tolerância ao estresse em milho tropical e temperado (SOUZA et al., 2008; MITI et al., 2010; MAIA et al., 2011; CAIXETA, 2012; DOVALE et al., 2013).

A compreensão do controle genético da característica de interesse é importante para um programa de melhoramento genético, pois irá definir qual o tipo cultivar a ser lançado e a unidade de avaliação e seleção. Em relação à EUN os resultados são contraditórios. DeLima (2010) afirma que os efeitos não aditivos foram mais importantes na expressão da EUN, ou seja, a seleção de genótipos superiores deve ser feita com base no desempenho dos híbridos. No entanto, DoVale et al. (2012) trabalhando com o mesmo germoplasma deste projeto, verificou que os efeitos genéticos aditivos apresentam maior importância para a EUN, ao passo que, a seleção poderia ser realizada pelo desempenho individual das linhagens genitoras dos híbridos.

Independente disto, para que se obtenha maior sucesso na seleção para EUN, a mesma deve ser feita submetendo as plantas não apenas às condições ideais, mas também, à condição estressante. Isto porque, pelo menos parte dos genes que controlam a produtividade de grãos em condições de estresse abiótico são diferentes dos que controlam a produtividade em condições ótimas de cultivo. Assim, um material selecionado em condições favoráveis não, necessariamente, será o melhor em condições de estresse (SOUZA et al., 2009). Para a seleção, o estresse aplicado às plantas deve ter duração prolongada o suficiente para que este coincida com estádios críticos de desenvolvimento. Além disso, sua intensidade deve ser severa o bastante para afetar os caracteres correlacionados com a produtividade, mas brando o suficiente para permitir a verificação de diferenças entre os materiais. Por fim, o manejo do estresse deve ser uniforme no tempo e no espaço, reduzindo o erro experimental e facilitando a verificação da variância genética (BÄNZIGER et al., 2000).

Trabalhos com melhoramento para a EUN já vêm sendo realizados, simultaneamente, em condições ótimas e estressantes de cultivo. Assim, a utilização de índices que reúnem o desempenho dos genótipos nos dois ambientes pode auxiliar o melhorista na seleção de materiais superiores para ambas as situações (WU et al., 2011), dando mais plasticidade fenotípica, adaptabilidade e estabilidade aos novos cultivares desenvolvidos.

Índices de resposta de plantas ao estresse são expressões matemáticas que reúnem informações fenotípicas relevantes, compondo um valor que auxilia na seleção dos melhores genótipos para uma determinada característica. Com estes, a seleção pode ser feita

observando o desempenho das plantas na condição favorável e em estresse, usando os *escores* que agrupam ambas as situações em apenas um valor.

Um exemplo é a Eficiência Agronômica do Nitrogênio (EAGN), descrita por Craswell e Godwin (1984), a qual é a relação entre a diferença de produtividade de grãos da condição favorável e desfavorável de cultivo pela diferença entre as doses de nitrogênio aplicado em ambas as condições. Neste índice, quanto maior a diferença de produtividade entre as duas situações, maior será seu valor. Dessa forma, este índice verifica a capacidade que a planta possui de aumentar sua produtividade com o incremento da quantidade de nitrogênio aplicado, o que pode ser entendido como eficiência no uso de nitrogênio ou responsividade à adubação nitrogenada.

Miti et al. (2010) por sua vez introduziram o Índice de Tolerância à Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (ITBN), o qual relaciona a produtividade de grãos nas duas condições, obtendo o percentual de redução da produtividade do ambiente estressante em relação ao ambiente ótimo. Este índice vai ao encontro do conceito de tolerância ao estresse, sendo que, quanto menor a perda de produtividade da condição estressante para a ótima, menor será o valor do índice e mais tolerante a planta será ao estresse.

Recentemente, Wu et al. (2011) propuseram o índice de Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (EABN). Este faz a mesma relação entre a produtividade de grãos nas duas condições, assim como o ITBN, no entanto, esta razão é multiplicada pela produtividade na condição de estresse. Por meio desse arranjo matemático, este índice não prioriza uma maior diferença de produtividade entre as duas situações, nem se atenta ao percentual de redução de uma condição para outra. A seleção por meio da EABN levaria a seleção de plantas produtivas tanto em ambientes favoráveis quanto desfavoráveis. Sendo assim, EABN que é apresentado como um índice de resposta das plantas ao estresse, pode ser entendido como um índice de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio, pois preconiza a seleção de plantas que tenham um comportamento satisfatório em condições ótimas e estressantes de cultivo.

Não obstante a estes índices, podemos citar ainda o método da Média Harmônica da Performance Relativa (MHPR). Este método verifica o desempenho relativo dos materiais ao longo dos diversos ambientes, sendo utilizado com índice de estabilidade e adaptabilidade (RESENDE, 2007a). No contexto de estresse por nitrogênio, este índice preconiza a seleção de materiais produtivos em ambas as situações, podendo ser interpretado como um índice de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio.

De modo geral, o objetivo dos programas de melhoramento para EUN pode ser entendido como a manutenção da produtividade reduzindo a quantidade de nitrogênio aplicado, ou ainda, o aumento da produtividade mantendo a dose de nitrogênio estável (GOOD; SHRAWAT; MUENCH, 2004). Assim, nota-se que a seleção por meio da EAGN poderia levar a seleção de plantas pouco produtivas na condição de estresse, o que não corrobora com o objetivo visado. Já a seleção por meio de ITBN não faz distinção entre a magnitude das produtividades obtidas, de modo que, genótipos menos produtivos em ambas as condições, mas que, comparativamente, reduzem pouco sua produtividade, poderiam ser os selecionados. No entanto, o ITBN tem sua importância em programas de melhoramento específicos para tolerância ao estresse. Por fim, a seleção com base na EABN e MHPR parece fazer um melhor balanço entre eficiência no uso e tolerância ao estresse, priorizando plantas produtivas em ambas as condições.

1.3 Melhoramento para precocidade e produtividade

Praticamente todo o incremento de produtividade na cultura do milho é resultado da interação entre práticas superiores de cultivo e o melhoramento genético, sendo este último responsável por cerca de 50 a 70% do total (DUVICK, 2005). No entanto, a seleção não pode ser baseada apenas em produtividade, já que existe uma série de caracteres de interesse cruciais para o sucesso da cultura. Neste sentido, em se tratando de milho de segunda safra, a precocidade é uma característica que se destaca, devido à época de plantio em que está inserido, com alto risco de instabilidades climáticas. Assim genótipos mais precoces são preconizados, devido à menor possibilidade de perdas com adversidades (DUARTE, 2008).

Existem algumas formas de avaliar plantas de milho para precocidade. Uma delas é com base no tempo para o florescimento feminino ou número de dias para que a planta chegue ao estágio reprodutivo. Segundo Fancelli e Dourado Neto (2000), o número de dias que a planta de milho leva do florescimento feminino à maturação fisiológica varia pouco entre os materiais genéticos, sendo a quantidade de dias em estágio vegetativo um bom indicativo de precocidade.

Outra forma é pela umidade dos grãos no momento da colheita. Em milho para grãos, a colheita normalmente não é feita no estágio de maturação fisiológica, mas sim quando os grãos atingem uma umidade favorável para a debulha. Assim, a avaliação por meio da umidade de grãos no momento da colheita é interessante por se tratar de um parâmetro diretamente utilizado pelos produtores rurais (MANTOVANI; PIMENTEL, 2015). Segundo Hallauer, Carena e Miranda Filho (2010) além de estes caracteres serem bons indicadores

para a seleção de precocidade, estes apresentam herdabilidades médias (em torno de 60%) e predominância de efeitos aditivos, ou seja, a seleção poderia ser feita em linhagens, visando o desenvolvimento de híbridos precoces.

No entanto, segundo Taiz e Zeiger (2013) a precocidade *per se* é uma desvantagem quando se almeja obter maior produtividade. Isto porque plantas precoces tem pouco tempo de recuperação em caso de estresses diverso. Adicionalmente, híbridos de milho tardios possuem um período de enchimento de grãos mais prolongado que o de híbridos precoces, o que leva a um menor potencial produtivo destes (MAGALHÃES et al., 2002). Porém, devido às condições ambientais na qual o milho de segunda safra é submetido, o plantio de híbridos tardios resultaria em perdas superiores em comparação ao plantio de materiais precoces, mesmo que estes tenham menor potencial produtivo ou sejam mais suscetíveis à estresses. Neste contexto, a seleção simultânea para estas duas características pode auxiliar no desenvolvimento de materiais precoces, mas ao mesmo tempo, com potencial produtivo satisfatório, sendo estes, ideais para o cultivo do milho segunda safra.

1.4 Seleção simultânea de caracteres

Para os programas de melhoramento de plantas, muitas vezes a seleção baseada em apenas uma característica leva a resultados pouco satisfatórios. Os produtores rurais da atualidade demandam plantas que reúnam, simultaneamente, uma série de atributos favoráveis, que de forma direta ou indireta, culminem em altas produtividades maior estabilidade e rentabilidade (CRUZ; CARNEIRO, 2006).

Selecionar simultaneamente para caracteres que apresentem uma correlação negativa dificulta o processo de melhoramento, mas não o impossibilita. Um exemplo clássico está na relação produtividade e capacidade de expansão em milho pipoca que, mesmo com a ocorrência desta correlação desfavorável, Granate, Cruz e Pacheco (2002), obtiveram ganhos de seleção simultânea satisfatórios.

Não obstante, Maia et al. (2011) relataram que a eficiência no uso e a tolerância ao estresse são controlados por múltiplos genes dispersos em diferentes regiões do genoma. Além disso, eficiência e tolerância apresentam correlação negativa. Isto se deve, possivelmente, a relações de pleiotropia, ligação gênica em fase de repulsão ou desequilíbrio de ligação entre os vários grupos gênicos que governam as duas características. Com isso, a seleção simultânea é possível, se estas forem controladas por grupos gênicos diferentes, e se os mecanismos morfofisiológicos que conferem a eficiência no uso e a tolerância ao estresse não forem competitivos.

Analogamente, precocidade e produtividade também são controlados por múltiplos genes e apresentam uma correlação negativa, ou seja, plantas precoces tendem a serem menos produtivas. No entanto, como esta associação não é absoluta, é possível selecionar materiais precoces para o florescimento feminino, mas que permaneçam durante um período tão longo quanto possível no enchimento de grãos, resultando em maior potencial produtivo (MAGALHÃES et al., 2002).

Neste contexto, o melhoramento vem desenvolvendo diferentes estratégias de seleção simultânea. Diversos autores propuseram metodologias de seleção com as mais diversas formas de arranjos, como a seleção via Análise Gráfica, o índice Aditivo (RESENDE, 2007b) e o índice de Mulamba e Mock (1978).

A seleção por meio da Análise Gráfica, também conhecida como seleção por níveis independentes, é extremamente usual por sua facilidade e praticidade na obtenção dos genótipos superiores. Este método é utilizado em seleção simultânea para duas características, sendo cada uma destas plotada em um dos eixos do gráfico. Na sequência, plotam-se os valores dos genótipos, posicionando-os de acordo com o valor obtido em cada característica. Dessa forma, é possível selecionar, visualmente, quais genótipos atingiram o nível mínimo em ambos os caracteres. Mesmo sendo de fácil aplicação, este método recebe críticas, pois é limitado a apenas duas características simultâneas e não considerando os pesos econômicos das mesmas (BERNARDO, 2010).

Os índices de seleção constituem uma alternativa mais eficiente quando comparada a Análise Gráfica (BERNARDO, 2010). Os índices de seleção são, geralmente, funções lineares nas quais diferentes caracteres recebem um peso de acordo com sua relevância, e, em alguns casos, os valores são ponderados pela covariância entre os caracteres, sendo calculado um valor que representa o genótipo em duas ou mais características simultaneamente.

Já o índice Aditivo proposto por Resende (2007b), se assemelha ao índice clássico de seleção proposto por Smith (1936) e Hazel (1943), sendo constituído pelo somatório dos valores das diversas características, sendo cada uma delas multiplicada por um peso econômico. Dessa forma, é possível priorizar variáveis. No entanto, há a dificuldade em se estabelecer os pesos econômicos adequados para essas características (CRUZ; CARNEIRO, 2006).

Desenvolvido por Mulamba e Mock (1978), o índice com base na soma de postos ou ranques consiste no ranqueamento médio dos genótipos para as características analisadas. O valor do índice é dado pela média da posição de cada material nos diferentes ranques. Este índice não utiliza a matriz de variância e covariância dos fatores e abre mão da atribuição de

pesos econômicos aos caracteres. Portanto, o mesmo é utilizado em situações que as características possuem a mesma importância relativa.

1.5 BLUP *single-trait* e BLUP *multi-trait*

Adicionalmente as metodologias apresentadas, deve-se destacar a Máxima verossimilhança restrita / Melhor preditor linear não viesado (REML/BLUP) *multi-trait*. Enquanto o REML/BLUP *single-trait* prediz o valor genotípico de um genótipo para uma característica de forma independente, o *multi-trait* prediz, simultaneamente, os valores genotípicos para duas ou mais variáveis de um genótipo, considerando a correlação existente entre estas variáveis, ou seja, as mesmas têm seus valores corrigidos pela covariância que há entre elas.

O BLUP *multi-trait* é amplamente utilizado em programas de melhoramento animal. Em plantas, há trabalhos com seleção simultânea em milho pipoca, no qual, o interesse principal está em duas variáveis negativamente correlacionadas. Por exemplo, Viana et al. (2010) trabalhando com famílias de meio irmãos em milho pipoca para capacidade de expansão e a produtividade verificou que o BLUP *multi-trait* apresentou maior acurácia quando comparado ao BLUP *single-trait* para a seleção entre famílias. Os autores citam ainda que o aumento da eficiência do BLUP *multi-trait* é proporcional ao aumento da diferença entre a correlação genética e ambiental entre as variáveis. Neste contexto, Schaeffer (1984), afirma que a decisão entre usar o BLUP *multi-trait* ou *single-trait* está na herdabilidade e na correlação das variáveis. Quando se têm herdabilidades similares e uma correlação positiva entre os caracteres, a utilização do BLUP *multi-trait* pode não significar um aumento na acurácia de predição dos valores genotípicos.

Referências

- BÄNZINGER, M.; EDMÉADES, G.O.; BECK, D.; BELLON, M. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice**. Mexico: CIMMYT, 2000. 68 p.
- BERNARDO, R. Selection for multiple traits. In: _____. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury: Stemma Press, 2010. p. 323-336.
- CAIXETA, D. **Seleção precoce e indireta para eficiência no uso de nitrogênio em milho**. 2012. 58 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**. v. 2: safra 2014/15 n. 4 - Quarto levantamento. Brasília, 2015. 95 p.

CRAWELL, E.T.; GODWIN, D.C. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates. In: TINKER, P.B.; LAUCHLI, A. **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger Publ., 1984. v. 1, p. 1-55.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa: UFV. 2006. v. 2, 585 p.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa: UFV. 2012. v. 1, 514 p.

DELIMA, R.O. **Herança e correlação de caracteres de raiz e eficiência no uso de nitrogênio em milho**. 2010. 38 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

DOVALE, J.C.; DELIMA, R.O.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G.V. Melhoramento para eficiência no uso de nitrogênio. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 81-99.

DOVALE, J.C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; BERMUDEZ, F.; MIRANDA, G.V. Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 385-392, mar. 2012.

DOVALE, J.C.; MAIA, C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G.V.; CAVATTE, P.C. Genetic responses of *traits* relationship to components of nitrogen and phosphorus use efficiency in maize. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 35, n. 1, p. 31-38, mar. 2013.

DUARTE, A.P. Milho safrinha: características e sistema de produção. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa: UFV, 2008. p. 109-138.

DUVICK, D.N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). **Advances in Agronomy**, Ames, v. 86, p. 83-145. 2005.

DUVICK, D.N.; CASSAMAN, K.G. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. **Crop Science**, Madison, v. 39. p. 1622-1630. 1999.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: _____. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. p. 21-54.

GALVÃO, J.C.C.; TROGELLO, E.; PEREIRA, L.P.L. Milho segunda safra. In: BORÉM, A.; GALVÃO, J.C.C.; PIMENTEL, M.A. **Milho do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2015. p. 207-223.

GERAGE, A.C.; BIANO, R.A. A produção de milho na "safrinha". **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 14, n. 164, p. 39-44, 1990.

GOOD, A.G.; SHRAWAT, A.K.; MUENCH, D.G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 9, n. 12, p. 597-605, Dec. 2004.

GRANATE, M.J.; CRUZ, C.D.; PACHECO, C.A.P. Predição de ganho genético com diferentes índices de seleção no milho pipoca CMS-43. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 7, p. 1001-1008, jul. 2002.

HALLAUER, A.R.; CARENA, M.J.; MIRANDA FILHO, J.B. Hereditary variance: experimental estimate. In: _____. **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. p. 169-221.

HAZEL, L.N. The genetic basis for constructing selection index. **Genetics**, Bethesda, v. 28, p. 476-490, 1943.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; CARNEIRO, N.P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA, CNPMS, 2002. 23 p.

MAIA, C.; DOVALE, J.C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; CAVATTE, P.C.; MIRANDA, G.V. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 11, p. 270-275, 2011.

MANTOVANI, E.C.; PIMENTEL, M.A.G. Colheita. In: BORÉM, A.; GALVÃO, J.C.C.; PIMENTEL, M.A. **Milho do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2015. p. 323-351.

MITI, F.; TONGOONA, P.; DERERA, J. S1 selection of local maize landraces for low soil nitrogen tolerance in Zambia. **African Journal of Plant Science**, Nairobi, v. 4, p. 67-81, Mar. 2010.

MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant *traits*. **Journal of Genetics and Cytology**, Alexandria, n. 7, p. 40-51, 1978.

QUIESSI, J.A.; DUARTE, A.P.; BICUDO, S.J.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z. Rendimento de grãos e características fenológicas do milho em diferentes épocas de semeadura em Tarumã (SP). In: SEMINÁRIO SOBRE A CULTURA DO MILHO "SAFRINHA", 1999, Barretos. **Anais...** Campinas: IAC, 1999. p. 239-247.

RESENDE, M.D.V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007a. 561 p.

_____. **Selegen-reml/blup**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas. 2007b. 359 p.

SCHAEFFER, L.R. Sire and cow evaluation under multiple *traits* model. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 67, p. 1567-1580, 1984.

SMITH, H.F. A discriminant function for plant selection. **Annals of Eugenics**, London, v. 7, p. 240-250, 1936.

SOUZA, L.V.; MIRANDA, G.V.; GALVÃO, J.C.C.; ECKERT, F.R.; MANTOVANI, E.E.; LIMA, R.O.; GUIMARÃES, L.J.M. Genetic control of grain yield and nitrogen use efficiency in tropical maize. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1517-1523. 2008.

SOUZA, L.V.; MIRANDA, G.V.; GALVÃO, J.C.C.; GUIMARÃES, L.J.M.; SANTOS, I.C. Combining ability of maize grain yield under different levels of environmental stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1297-1303. 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Respostas e adaptações ao estresse abiótico. In: _____. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. p. 753-780.

VIANA, J.M.S.; SOBREIRA, F.M.; DE RESENDE, M.D.V.; FARIA, V.R. *Multi-trait* BLUP in half-sib selection of annual crops. **Plant Breeding**, Malden, v. 129, p. 599-604, 2010.

WISSUWA, M.; MAZZOLA, M.; PICARD, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related *traits*. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 321, p. 409-430. 2009.

WU, Y.; LIU, W.; LI, X.; LI, M.; ZHANG, D.; HAO, Z.; WENG, J.; XU, Y.; BAI, L.; ZHANG, S.; XIE, C. Low-nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbreds: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation. **Euphytica**, Amsterdam, v. 180, p. 281-290, 2011.

2 ACURÁCIA DA SELEÇÃO SIMULTÂNEA PARA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE E EFICIÊNCIA NO USO DE NITROGÊNIO EM LINHAGENS DE MILHO TROPICAL

Resumo

Com a elevada demanda de nitrogênio (N) do milho e a migração do plantio deste para áreas de fertilidade reduzida, tem-se a necessidade do desenvolvimento de genótipos que apresentem produtividades satisfatórias tanto em condições nutricionais favoráveis como em desfavoráveis de cultivo. Com isso, o objetivo foi verificar a possibilidade de selecionar, simultaneamente, linhagens de milho tropical tolerantes ao estresse e eficientes no uso de nitrogênio, e verificar se há diferença entre os métodos estatísticos de seleção simultânea neste contexto. Para isto, 64 linhagens de milho tropical foram avaliadas em dois locais, com duas disponibilidades de nitrogênio (ideal e baixa disponibilidade), para quatro índices de resposta das plantas ao estresse: Eficiência Agronômica à Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (EABN); Media Harmônica da Performance Relativa (MHPR); Eficiência Agronômica do Nitrogênio (EAGN); e Índice de Tolerância à Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (ITBN). Os valores genotípicos dos materiais para estes índices foram preditos por meio de equações de modelos mistos do tipo REML/BLUP *single-trait* (univariado). Para os dois últimos, também foram realizadas análises do tipo REML/BLUP *multi-trait* (multivariado). Em seguida, seis cenários de seleção para EAGN e ITBN foram considerados, sendo três métodos de seleção simultânea (Análise Gráfica, índice Aditivo e índice de Mulamba-Mock) a partir de dois métodos de predição dos valores genotípicos (REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*). Adicionalmente, os valores genotípicos de EABN e MHPR preditos via REML/BLUP *single-trait* foram utilizados *per se*, como métodos de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio, totalizando assim, oito cenários. Todos estes foram comparados quanto aos ganhos com a seleção e a acurácia seletiva. A metodologia de predição dos valores genotípicos via REML/BLUP *multi-trait* se mostrou superior a *single-trait*. Devida a alta correlação desfavorável entre EAGN e ITBN, a correção dos valores genotípicos com base na covariância entre estes, levou a uma seleção mais acurada e com maiores ganhos. Todavia, a MHPR, por seu desempenho superior quanto aos parâmetros de diferenciação e pela possibilidade de incluir mais de dois níveis de estresse em sua formula, pode ser considerada a melhor metodologia de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio.

Palavras-chave: Estresse abiótico; Índices de seleção; Modelos mistos; Correlação entre caracteres; Milho segunda safra

Abstract

With the high demand for nitrogen (N) and maize planting migration to low fertility areas, there is the need to develop genotypes which have satisfactory yields in favorable and unfavorable nutritional conditions. Therefore, the objective was to assess the possibility to simultaneously select maize tropical lines that are nitrogen stress tolerant and nitrogen use efficient, and check if there are differences among the statistical methods for simultaneous selection in this situation. This way, 64 tropical maize lines were evaluated in two locations and two nitrogen levels (ideal and low availability) for four responses indexes of stressed

plants: Low Nitrogen Agronomic Efficiency (LNAE); Harmonic Mean of the Relative Performance (HMRP); Nitrogen Agronomic Efficiency (NAE); and Low Nitrogen Tolerance index (LNTI). The lines genotypic values for these indexes were predicted using mixed models equations REML/BLUP single-trait (univariate). In addition, NAE and LNTI had their genotypic values predicted by multi-trait (multivariate). Then, six methodologies for simultaneous selection to NAE and LNTI were made, using three simultaneous selection methods (Graphical Analysis, Additive index and Mulamba-Mock index) through two genotypic value prediction methods (REML/BLUP single-trait and multi-trait). In addition, the genotypic value of LNAE and HMRP was used *per se* as simultaneous selection methods to nitrogen use efficiency and nitrogen stress tolerance. All these eight methods were compared for selection gain and accuracy. The REML/BLUP multi-trait was superior to the single-trait. Due to high unfavorable correlation between NAE and LNTI, the correction of genotypic values based on the covariance between them led to high accurate selection gains. However, due to the superior performance in the differentiation parameters and the possibility to include more than two stress levels in your formula, HMRP could be considered the best simultaneous selection methodology for nitrogen use efficiency nitrogen stress tolerance.

Keywords: Abiotic stress; Index selection; Mixed models; Correlation between traits; Second growing season maize

2.1 Introdução

Com o avanço do cultivo do milho para as áreas do Cerrado, vem a necessidade em desenvolver novos cultivares adaptados a estes ambientes, os quais são geralmente formados por solos de baixa fertilidade em nitrogênio (N) (GIÁCOMO et al., 2015). Adicionalmente, a chamada segunda safra (milho safrinha) é caracterizada pelo baixo investimento em adubação e controle fitossanitário, quando comparado à primeira safra. Fato decorrente do maior risco de déficit hídrico e demais condições ambientais desfavoráveis nessa estação (BICUDO et al., 2009). No entanto, para a obtenção de altas produtividades na cultura do milho, são necessárias altas doses de adubos.

Para o nitrogênio, a recomendação pode chegar a mais de 200 kg ha⁻¹. Logo é necessário um alto investimento inicial, o que nem sempre é possível para pequenos e médios agricultores (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS, 2004). Somando-se a esta questão, a eficiência na adubação nitrogenada geralmente é menos de 50%. Isto se deve aos processos de perda de nitrogênio por volatilização, desnitrificação e lixiviação (GALLAIS; HIREL, 2004). Deste modo, a eficiência da adubação nitrogenada se torna um fator preponderante na produção de biomassa, de grãos e nos custos de produção (PENG et al., 2013), uma vez que a cultura do milho é a principal consumidora do adubo nitrogenado, o qual soma algo em torno de 1,28 milhões de toneladas por ano no Brasil (PETROBRAS, 2014).

Por meio do melhoramento genético é possível desenvolver cultivares de milho mais eficientes no uso de nitrogênio, ou seja, genótipos que produzem a mesma quantidade de grãos, porém, com menor demanda de N. Neste cenário, cada ponto percentual em que o melhoramento auxiliar na redução do uso de ureia em milho no Brasil, significaria uma diminuição de 12,67 mil toneladas, o que representaria uma economia aos produtores de US\$ 6,83 milhões ao ano. Adicionalmente, segundo Cantarella (2007), na cultura do milho, as perdas de N por lixiviação de nitrato são da ordem de 4% e, no mínimo, de 5% por volatilização do total aplicado. Assim, este mesmo ponto percentual de aumento na eficiência no uso de nitrogênio significaria a redução de 215 toneladas de N por ano nas contaminações dos lençóis freáticos brasileiros e, no mínimo, 269 toneladas de N deixariam de ser liberados na atmosfera sob a forma de amônia.

Outra forma de contornar o estresse por baixo nitrogênio no solo é pela tolerância ao estresse, a qual é definida como a capacidade da planta em resistir às condições adversas deixando descendentes (MAIA et al., 2011). Estas plantas são importantes em situações de solos pobres em fertilidade e baixo investimento em adubação. No entanto, plantas tolerantes ao estresse não apresentam bom desempenho em situações favoráveis de cultivo, quando comparadas com plantas eficientes no uso.

Diante do exposto, nota-se a necessidade do entendimento da relação existente entre eficiência no uso e tolerância ao estresse, visando a possibilidade de ganhos simultâneos em ambos os caracteres, de modo que as plantas apresentem produtividades satisfatórias em baixa disponibilidade de N, mas também, que sejam capazes de atingir altas produtividades em condições nutricionais favoráveis.

Para a seleção simultânea de eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio, pode-se utilizar da análise gráfica, a qual consiste plotagem dos valores dos genótipos para ambas as características, dessa forma é possível selecionar, visualmente, quais genótipos atingiram o nível mínimo desejável em ambos os caracteres. Outra alternativa são os índices de seleção, os quais são funções lineares nas quais diferentes caracteres recebem um peso de acordo com sua relevância, sendo calculado um valor que representa o genótipo em duas ou mais características simultaneamente (BERNARDO, 2010).

Adicionalmente, os valores genotípicos dos materiais podem ser preditos via Máxima verossimilhança restrita / Melhor preditor linear não viesado (REML/BLUP) *multi-trait*. Neste, a predição dos valores genotípicos considera a covariância existente entre os caracteres. Assim, esta metodologia de predição pode levar a seleção mais acurada em caracteres altamente correlacionados (VIANA et al., 2010).

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Objetivos

2.2.1.1 Objetivo geral

Verificar a acurácia da seleção simultânea para tolerância ao estresse e eficiência no uso de nitrogênio em linhagens de milho tropical.

2.2.1.2 Objetivos específicos

- Verificar se é possível selecionar simultaneamente linhagens de milho tropical tolerantes ao estresse por baixa disponibilidade de nitrogênio e eficientes no uso de nitrogênio.
- Identificar diferenças entre os métodos estatísticos de seleção simultânea de para condições de estresse por nitrogênio e ideais de cultivo.

2.2.2 Material e métodos

2.2.2.1 Multiplicação das linhagens de milho tropical

Primeiramente, foi realizada a multiplicação de sementes das sessenta e quatro linhagens de milho tropical, com grande variabilidade genética para EUN (DOVALE et al., 2013), com o objetivo de obter sementes suficientes e com boa taxa de germinação para a implantação dos experimentos desta pesquisa. As parcelas foram constituídas por linhas de quatro metros de comprimento, com espaçamento de 0,85 metros entre linhas e 0,20 metros entre plantas. Foram semeadas 20 sementes por linha. O manejo e tratos culturais foram realizados conforme recomendado para a cultura do milho (EMBRAPA, 2014).

Esta etapa foi realizada na área experimental do Departamento de Genética da ESALQ/USP, em Piracicaba – SP (22°42'23"S, 47°38'14"W, 535h).

2.2.2.2 Instalação e condução dos experimentos no campo

As sessenta e quatro linhagens foram avaliadas na Estação Experimental de Anhembi, pertencente a ESALQ/USP em Anhembi – SP (22°50'51.96"S, 48° 01'06"W, 466h), na segunda safra de 2014 e 2015 e no campo experimental do Departamento de Genética da ESALQ/USP em Piracicaba – SP, na segunda safra de 2015. Foi considerado cada combinação ano-local com sendo um ambiente, totalizando de três ambientes distintos.

O delineamento experimental foi o látice simples (8x8), com duas repetições, sendo cada repetição composta por duas unidades experimentais, uma cultivada com disponibilidade ideal de nitrogênio e outra cultivada com baixa disponibilidade de nitrogênio. Cada unidade experimental foi constituída de uma linha de cinco metros com espaçamento entre linhas de 0,80 metros e entre plantas de 0,20 metros.

A adubação de plantio foi constituída de 300 kg ha⁻¹ do formulado NPK 4-14-8. Para determinar a dose de N, foi levado em consideração o efeito do nitrogênio para redução de, em média, 50% da produtividade do milho (DOVALE et al., 2011). Sendo assim, no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (BN) foram aplicados 35 kg ha⁻¹ de N, sendo 12 kg aplicados no plantio e o restante em cobertura. Já para o ambiente de disponibilidade ideal de nitrogênio (AN) foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N, sendo, 12 kg aplicados no plantio e o restante em cobertura. Em ambos os ambientes, foram feitas duas adubações de cobertura, aos 30 dias (V6) e aos 50 dias (VT) após o plantio.

O manejo e os tratos culturais foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados para a cultura do milho (EMBRAPA, 2014).

2.2.2.3 Caracteres avaliados

Em cada unidade experimental, foram coletados os dados de estande (número de plantas na parcela no estágio de maturação fisiológica). Em seguida, com a realização da colheita, foram coletados os dados de produtividade de grãos (PG) em kg ha⁻¹ e de umidade de grãos em (%). Por meio desses dados, a produtividade foi corrigida para umidade de grãos com base seca a 13%. A correção da produtividade com base no estande não foi necessária, já que o mesmo apresentou diferença significativa.

2.2.2.4 Índices de resposta das plantas ao estresse por nitrogênio

A partir dos dados acima descritos e das doses de N aplicadas, três índices de resposta das plantas ao estresse foram estimados para cada genótipo em cada repetição. Primeiramente, foi estimado o índice descrito por Wu et al. (2011), conhecido como Eficiência Agrônômica à Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (EABN):

$$EABN_{ij} = \frac{PG_{(BN)ij}}{PG_{(AN)ij}} \cdot PG_{(BN)ij}$$

em que, $EABN_{ij}$ é eficiência agronômica à baixa disponibilidade de nitrogênio da linhagem i na repetição j ; $PG_{(AN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $PG_{(BN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j .

Em seguida, foi estimado a Média Harmonia da Performance Relativa (MHPR), (RESENDE, 2007a):

$$MHPR_{ij} = \frac{2}{\left(\frac{PG_{(AN)ij}}{\bar{X}_{(AN)}} \right)^{-1} + \left(\frac{PG_{(BN)ij}}{\bar{X}_{(BN)}} \right)^{-1}}$$

em que, $MHPRVG_{ij}$ é a Média Harmônica da Performance Relativa dos Valores Genotípicos da linhagem i na repetição j ; $PG_{(AN)i}$ é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $PG_{(BN)i}$ é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $\bar{X}_{(AN)}$ é a média geral do ambiente de alta disponibilidade de N; $\bar{X}_{(BN)}$ é a média geral do ambiente de baixa disponibilidade de N.

Na sequência foi estimado o índice descrito por Craswell e Godwin (1984), conhecido como Eficiência Agronômica do Nitrogênio (EAGN):

$$EAGN_{ij} = \frac{PG_{(AN)ij} - PG_{(BN)ij}}{N_{(AN)} - N_{(BN)}}$$

em que, $EAGN_{ij}$ é a eficiência agronômica do nitrogênio da linhagem i na repetição j ; $PG_{(AN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $PG_{(BN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $N_{(NA)}$ é a quantidade de nitrogênio aplicada no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio; $N_{(BN)}$ é a quantidade de nitrogênio aplicada no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio.

Por fim, foi estimado o índice de Tolerância à Baixa Disponibilidade de Nitrogênio (ITBN), descrito por Miti et al. (2010):

$$ITBN_{ij} = (1 - \frac{PG_{(BN)ij}}{PG_{(AN)ij}}).100$$

em que, $ITBN_{ij}$ é o índice de tolerância à baixa disponibilidade de nitrogênio da linhagem i na repetição j ; $PG_{(AN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j ; $PG_{(BN)ij}$ é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j .

2.2.2.5 Análise de deviance e equações de modelos mistos

Após a obtenção dos índices de resposta ao estresse, para cada repetição de cada linhagem, foi realizada a análise de deviance (ANADEV) por meio do pacote ASReml-R[®] (GILMOUR et al., 2009) do software R (R CORE TEAM, 2014) Também foram estimados os componentes de variância e os valores genotípicos das linhagens para cada índice por meio do método da Máxima Verossimilhança Restrita/Melhor Preditor Linear Não-viesado (REML/BLUP), conforme descrito por Resende (2007b):

$$y = Xr + Zg + Wb + Ti + \varepsilon$$

em que, y é o vetor de observações dos índices de resposta das plantas ao estresse (EABN, MHPR, EAGN, ITBN); r é o vetor do efeito de ambiente e repetição dentro de ambiente, somados à media geral, considerado como fixo, em que $r \sim N(r, \Phi r)$; g é o vetor do efeito de linhagem, considerado como aleatório, em que $g \sim N(0, G)$; b é o vetor do efeito de bloco dentro de repetição, considerado como aleatório, em que $b \sim N(0, \sigma_b^2)$; i é o vetor do efeito da interação linhagem x local, considerado como aleatório, em que $i \sim N(0, \sigma_i^2)$; ε é o erro experimental. X , Z , W e T são matrizes de incidência que relacionam os efeitos dos vetores independentes de cada matriz ao vetor dependente y .

Foram preditos os valores genotípicos das linhagens para EABN, MHPR, EAGN, ITBN por meio do REML/BLUP *single-trait* (análise univariada). Adicionalmente, por meio do REML/BLUP *multi-trait* (análise multivariada) os valores genotípicos das linhagens foram preditos simultaneamente para EAGN e ITBN. Assim, as equações de modelos mistos (REML/BLUP) de ambas as situações de predição foram:

$$\begin{bmatrix} X'R^{-1}X & X'R^{-1}Z & X'R^{-1}W & X'R^{-1}T \\ Z'R^{-1}X & Z'R^{-1}Z + G_1 & Z'R^{-1}W & Z'R^{-1}T \\ W'R^{-1}X & W'R^{-1}Z & W'R^{-1}W + G_2 & W'R^{-1}T \\ T'R^{-1}X & T'R^{-1}Z & T'R^{-1}W & T'R^{-1}T + G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'R^{-1}y \\ Z'R^{-1}y \\ W'R^{-1}y \\ T'R^{-1}y \end{bmatrix}$$

em que para o *single-trait*, tem-se:

$$R = I_{(n1)}\sigma_e^2; G_1 = I_{(n2)}\sigma_g^2; G_2 = I_{(n3)}\sigma_b^2; G_3 = I_{(n4)}\sigma_i^2$$

em que, I é uma matriz identidade de dimensões n_1 (repetições x locais x linhagens), n_2 (linhagens), n_3 (blocos x repetições x locais) e n_4 (linhagens x locais); σ_e^2 , σ_g^2 , σ_b^2 e σ_i^2 são, respectivamente, os componentes de variância residual, variância genética, variância de bloco e variância da interação linhagem x local.

Para o *multi-trait*, tem-se:

$$R = I_{(n1)} \otimes Cov_e; G_1 = I_{(n2)} \otimes Cov_g; G_2 = I_{(n3)} \otimes Cov_b; G_3 = I_{(n4)} \otimes Cov_i$$

em que, I é uma matriz identidade de dimensões n_1 (repetições x locais x linhagens), n_2 (linhagens), n_3 (blocos x repetições x locais) e n_4 (linhagens x locais); Cov_e , Cov_g , Cov_b e Cov_i são, respectivamente, as matrizes de variâncias e covariâncias residual, genética, de bloco e da interação linhagem x local, entre as duas variáveis analisadas (EAGN e ITBN); $\otimes$ indica o produto Kronecker.

2.2.2.6 Métodos de seleção simultânea

Com a obtenção dos valores genotípicos das sessenta e quatro linhagens para produtividade e para os três diferentes índices de resposta das plantas ao estresse, por meio do REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*, foram considerados diferentes cenários de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse.

Neste contexto, como estimativa de eficiência no uso de nitrogênio foi utilizado o EAGN, e como estimativa de tolerância ao estresse por baixa disponibilidade de nitrogênio foi utilizado o ITBN. Deste modo, foram considerados, em um esquema fatorial (2x3), seis cenários de seleção simultânea, sendo dois métodos de predição de valores genotípicos

(REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*) e três métodos de seleção simultânea (seleção por Análise Gráfica, o índice Aditivo de seleção e o índice de Mulamba-Mock).

Por fim, valores genotípicos de EABN e MHPR obtidos via REML/BLUP *single-trait* foram utilizados, *per se*, como índice de seleção simultânea. Dessa forma, teve-se um total de oito cenários de seleção simultânea para eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio.

2.2.2.6.1 Eficiência agronômica ao baixo nitrogênio

A EABN *per se* foi considerada como um índice de seleção simultânea para a eficiência no uso e tolerância ao estresse por nitrogênio. Segundo Wu et al. (2011), este índice promove a seleção de plantas com desempenho satisfatório em condições ótimas e estressantes de cultivo.

2.2.2.6.2 Média Harmônica da Performance Relativa

A MHPR também foi utilizada como um índice *per se* de seleção simultânea. Similarmente ao que ocorre com EABN, o arranjo matemático deste índice leva a preconização de materiais produtivos ao longo de todos os ambientes. Neste caso, o mesmo leva a seleção de linhagens produtivas em alta e baixa disponibilidade de nitrogênio.

2.2.2.6.3 Índice Aditivo de seleção (IAD)

Proposto por Resende (2007b), este índice seleciona simultaneamente com base nos valores genotípicos obtidos para EAGN e ITBN. O mesmo foi estimado pela seguinte equação:

$$IAD_i = b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i}$$

na qual, **IAD_i** é o valor do índice Aditivo de seleção para a linhagem *i*; **b₁** representa o peso econômico da variável EAGN; **b₂** representa o peso econômico da variável ITBN; **X_{1i}** é o valor genotípico de EAGN na linhagem *i*; **X_{2i}** é o valor genotípico de ITBN na linhagem *i*.

Para a atribuição dos pesos econômicos atribuiu-se igualdade as duas características quanto à relevância destes. Assim, foi atribuído o valor de 0,5 como peso econômico para os índices de eficiência e tolerância. Devido a diferença de magnitude entre os valores genotípicos das linhagens para EAGN e ITBN, foi feita a padronização da média, dividindo

os valores observados pelo desvio padrão da característica. Os valores genotípicos de ITBN foram ainda multiplicados por menos um (-1), já que o objetivo foi selecionar genótipos com menor ITBN.

2.2.2.6.4 Índice de Mulamba-Mock (IMM)

O índice proposto por Mulamba e Mock (1978) dispensa a utilização de variâncias e covariâncias entre as variáveis, além da atribuição de pesos econômicos. O mesmo se baseia na soma de postos ou ranques dos indivíduos ao longo das diferentes variáveis selecionadas simultaneamente. No caso, por meio dos valores genotípicos das linhagens, foram feitos ranques para EAGN e ITBN. O valor do índice de seleção foi dado pela seguinte fórmula:

$$IMM_i = \frac{P_{1i} + P_{2i}}{2}$$

em que, IMM_i é o valor do índice seleção de Mulamba-Mock para a linhagem i ; P_{1i} é a posição da linhagem i no ranque de EAGN; P_{2i} é a posição da linhagem i no ranque de ITBN.

Após a obtenção dos valores das linhagens para este índice, um novo ranqueamento, agora único, foi feito, selecionado aquelas melhores posicionadas segundo ele.

2.2.2.6.5 Seleção via Análise Gráfica (AGR)

A seleção foi feita atribuindo a cada eixo do plano cartesiano os valores genotípicos das linhagens para EAGN e ITBN. Em seguida foram plotados esses valores genotípicos. Obteve-se assim, uma forma visual de verificação de desempenho das linhagens, sendo possível selecionar aquelas que apresentem, simultaneamente, valores favoráveis de eficiência no uso e tolerância ao estresse (localizadas no quadrante inferior direito).

2.2.2.7 Comparação dos métodos de seleção simultânea

Após a obtenção dos valores genotípicos das linhagens para cada um dos oito cenários de seleção simultânea, foi simulada uma intensidade de seleção de 10% das linhagens superiores em cada cenário. As diferentes estratégias de seleção simultânea foram comparadas entre si de acordo com os valores estimados de ganhos com seleção e acurácia seletiva:

$$GS(\%) = \frac{\left(\frac{\sum_i^n VG_{ij}}{n} \right)}{\bar{x}_j} \times 100 \quad \text{e} \quad \hat{r} = \left[1 - \frac{1}{1 + b \cdot \left(\frac{CVg^2}{CVe^2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

em que, $GS(\%)$ é o ganho de seleção esperado em porcentagem; VG_{ij} é o valor genotípico da linhagem selecionada i para a variável j ; n é o número de indivíduos selecionados; $\bar{x}_j$ é a média geral da variável j ; $\hat{r}$ é a acurácia seletiva; b é o número de repetições do delineamento; CVg^2 é o coeficiente de variação genético; CVe^2 é o coeficiente de variação residual.

2.2.3 Resultados

2.2.3.1 Análise de Deviance e parâmetros dos índices de resposta

Após a colheita, foi constatada a perda de um genótipo nos três ambientes os outros quatorze genótipos que foram perdidos em, pelo menos um dos ambientes. Sendo assim, o número final de materiais avaliados é de sessenta e três linhagens.

Pela análise de Deviance dos modelos *single-trait* foi observado que as linhagens apresentaram diferenças significativas para EABN, MHPR e ITBN. Não foi observada diferença significativa para EAGN. A interação linhagem x ambiente foi constatada apenas para EABN e MHPR (Tabela 1).

Tabela 1 – Teste de Wald para os efeitos fixos e de LRT para os efeitos aleatórios, estimados via REML/BLUP *single-trait* para dos índices de resposta das plantas ao estresse EABN, MHPR, EAGN e ITBN em linhagens de milho tropical

Fator de variação	EABN	MHPR	EAGN	ITBN
<i>Efeitos Fixos</i>				
Ambiente	60,99 ^{**}	0,680 ^{ns}	9,98 ^{**}	3,96 ^{ns}
Repetição/Ambiente	1,58 ^{ns}	9,20 [*]	5,57 ^{ns}	0,59 ^{ns}
<i>Efeitos Aleatórios</i>				
Bloco/Repetição	0,06 ^{ns}	4,10 ^{**}	0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Linhagem	27,61 ^{**}	62,38 ^{**}	0,26 ^{ns}	5,48 [*]
Linhagem x Ambiente	5,07 [*]	17,47 ^{**}	0,10 ^{ns}	3,82 ^{ns}

LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT ou F Wald; ** - significativo a 1% pela LRT ou F Wald

Em relação à análise *multi-trait*, a qual foi realizada para os índices de resposta EAGN e ITBN em conjunto, foi observada a significância para a maioria dos fatores de variação. No entanto, deve-se destacar que esta significância é inflacionada, uma vez que os efeitos testados por este modelo são, de fato, a interação entre os efeitos individuais com os caracteres avaliados (Tabela 2).

Tabela 2 – Teste de Wald para os efeitos fixos e de LRT para os efeitos aleatórios, estimados via REML/BLUP *multi-trait* para os índices de resposta das plantas ao estresse EAGN e ITBN em linhagens de milho tropical

Fator de variação	Testes estatísticos
<i>Efeitos Fixos</i>	F Wald
Caracteres	380,34**
Caracteres x Ambiente	35,35*
Caracteres x Repetição/Ambiente	20,81**
<i>Efeitos Aleatórios</i>	LTR
Caracteres x Bloco/Repetição	0,01 ^{ns}
Caracteres x Linhagem	30,96**
Caracteres x Linhagem x Ambiente	10,88**

LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT ou F Wald; ** - significativo a 1% pela LRT ou F Wald

Para os índices de resposta das plantas ao estresse que apresentaram interação linhagem x ambiente significativa, foi realizada a análise de deviance para cada ambiente. Observou-se que a significância de EABN ocorrem nos ambientes 1 (Anhembi 2014) e 3 (Piracicaba 2015). Já para a MHPR foi observado efeito significativo em todos os ambientes analisados (Tabela 3 e 4).

Tabela 3 – Análise de Deviance em linhagens de milho tropical para EABN nos três ambientes

Fator de variação	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3
Repetição	0,88 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Bloco/Repetição	0,01 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,23 ^{ns}
Linhagem	9,34**	1,78 ^{ns}	6,35*

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT; ** - significativo a 1% pela LRT

Tabela 4 – Análise de Deviance em linhagens de milho tropical para MHPR nos três ambientes

Fator de variação	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3
Repetição	3,64 ^{ns}	0,35 ^{ns}	4,25*
Bloco/Repetição	0,01 ^{ns}	3,08 ^{ns}	1,82 ^{ns}
Linhagem	17,91**	5,71*	19,74**

MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa; LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT; ** - significativo a 1% pela LRT

Apesar de dois dos quatro índices de resposta das plantas ao estresse terem apresentado efeito significativo para linhagem x ambiente, a comparação entre os mesmos considerou a média de todos os ambientes. O estudo de diferentes locais foi realizado com o objetivo de identificar materiais produtivos e estáveis ao longo dos ambientes, não realizando assim, a seleção específica dos melhores em cada ambiente.

Em relação aos parâmetros de comparação entre os índices de resposta, a MHPR obteve o maior valor de herdabilidade e acurácia, além do menor valor de coeficiente de variação. No caso de EAGN e ITBN, verifica-se que estes, analisados via *multi-trait*, obtiveram valores de herdabilidade e acurácia superiores em comparação a análise *single-trait*. No entanto, os valores foram ainda muito inferiores ao desempenho de MHPR e EABN. Os valores de coeficiente de variação foram próximos e elevados para EAGN e ITBN preditos via *single-trait* e *multi-trait* (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros genéticos estimados via método *single-trait* e *multi-trait* em linhagens de milho tropical para os índices de resposta das plantas ao estresse EABN, MHPR, EAGN e ITBN

Parâmetros	<i>Single-trait</i>		<i>Single-trait</i>		<i>Multi-trait</i>	
	EABN	MHPR	EAGN	ITBN	EAGN	ITBN
Média ($\bar{x}$)	1568,89	1,01	7,39	0,26	7,41	0,26
Coef. variação (CV%)	41,38	19,94	82,68	59,89	84,61	64,18
Herdabilidade (h^2)	0,61	0,73	0,09	0,06	0,15	0,26
Acurácia ($\hat{r}$)	0,72	0,89	0,19	0,19	0,24	0,32

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa; EAGN - Eficiência Agronômica do Nitrogênio; ITBN - Índice de Tolerância a Baixa Disponibilidade e Nitrogênio

2.2.3.2 Ganhos com a seleção

Com a obtenção dos valores genotípicos para os índices de resposta das plantas ao estresse, consideraram-se os diferentes cenários de seleção simultânea. Nestes, os índices de seleção *per se* EABN e MHPH obtiveram boas estimativas de ganhos diretos. Para EAGN não houve ganho pois não foi observada variabilidade genética significativa para o mesmo, impossibilitando a seleção. Já para ITBN, houve ganhos genéticos com a seleção direta (univariada), sendo estes superiores quando analisados via *multi-trait* (Tabela 6).

Para as metodologias de seleção simultânea composta por EAGN e ITBN, além dos ganhos diretos, foram estimados também os ganhos indiretos com a seleção. Estes foram sempre superiores na análise *multi-trait* em comparação com a análise *single-trait*. É possível notar também que os ganhos indiretos foram idênticos entre as metodologias de seleção simultânea utilizando os valores de EAGN e ITBN preditos via análise *multi-trait*. (Tabela 6).

Isto porque foram os mesmos materiais a serem selecionados nas três metodologias (Tabela 7).

Tabela 6 – Ganhos com a seleção (%) para os índices de resposta das plantas ao estresse EABN, MHPR, ITBN e EAGN, e ganhos diretos e indiretos com a seleção (%) via índice Aditivo, Mulamba-Mock e Análise Gráfica utilizando os métodos de predição *single-trait* e *multi-trait* dos valores genotípicos em linhagens de milho tropical

Métodos de seleção	<i>Single-trait</i>			<i>Multi-trait</i>		
	Direto	Indireto		Direto	Indireto	
		Eficiência (EAGN)	Tolerância (ITBN)		Eficiência (EAGN)	Tolerância (ITBN)
EABN	46,51	-	-	-	-	-
MH	9,39	-	-	-	-	-
EAGN	0,00 ⁺	-	-	0,00 ⁺	-	-
ITBN	24,00	-	-	36,14	-	-
Aditivo*	9,56	2,77	7,08	47,21	12,15	24,24
Mulamba-Rank*	36,16	1,38	9,28	85,72	12,15	24,24
Análise Gráfica *	-	2,53	6,09	-	12,15	24,24

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa; EAGN - Eficiência Agronômica do Nitrogênio; ITBN - Índice de Tolerância a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; * - composto por EAGN e ITBN; + - sem seleção devido a ausência de variabilidade genética

Tabela 7 – Coincidência de linhagens a serem selecionadas nos diferentes métodos de seleção simultânea considerados e dois métodos de predição dos valores genotípicos (*single-trait* e *multi-trait*)

Métodos de seleção	Índices <i>per se</i>		<i>Single-trait</i>			<i>Multi-trait</i>		
	EABN	MHPR	IAD	IMM	AGR	IAD	IMM	AGR
<i>Índices per se</i>								
EABN	-	57%	57%	43%	29%	57%	57%	57%
MHPR		-	57%	43%	43%	57%	57%	57%
<i>Single-trait</i>								
IAD			-	86%	57%	100%	100%	100%
IMM				-	57%	86%	86%	86%
AGR					-	57%	57%	57%
<i>Multi-trait</i>								
IAD						-	100%	100%
IMM							-	100%
AGR								-

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa; IAD - Índice Aditivo; IMM - Índice de Mulamba-Mock; AGR - Análise Gráfica

2.2.4 Discussão

2.2.4.1 O desempenho dos índices *per se* de seleção EABN e MHPR

Ambos os índices *per se* de seleção simultânea apresentaram bom desempenho, visto os valores de acurácia e ganhos com a seleção. Os valores de acurácia, herdabilidade e coeficiente de variação foram mais favoráveis à MHPR. Por outro lado EABN apresentou

maior ganho com a seleção (Tabela 5 e 6). Entretanto, o ganho de seleção deve ser analisado com cautela, uma vez que seu valor expressa o ganho em relação ao valor do índice e não o ganho de produtividade em alto ou baixo N. Assim, para a constatação de qual índice é mais eficiente na seleção simultânea, deve-se observar desempenho dos materiais melhores posicionados por cada um deles nos ambientes de seleção (AN e BN) (Figura 2).

Assim, em situações nas quais uma determinada característica não apresenta variabilidade genética a ser explorada, não há ganhos com a seleção. Neste contexto, a MHPR se mostra mais estável na expressão de variabilidade genética, obtendo significância para este efeito em todos os ambientes (Tabelas 3 e 4). Além de estável, a variabilidade genética explorada por este índice é superior e se mostra menos sensível aos efeitos do ambiente, visto os valores de herdabilidade e coeficiente de variação, conduzindo assim, a uma seleção mais acurada (Tabela 5).

A MHPR ainda apresentou uma acentuada interação genótipo x ambiente, algo não verificado para EAGN. Esta interação genótipo x ambiente explica o reduzido valor no ganho de seleção da MHPR em relação ao ganho de EABN, uma vez que os ganhos conjuntos são reduzidos na presença de interação do tipo complexa (Tabela 8).

Tabela 8 – Ganhos com a seleção (%) de EABN e MHPR em média de ambiente e em cada ambiente para linhagens de milho tropical

Índices de seleção	Média	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3
EABN	46,51	47,62	0,00 ⁺	68,26
MHPR	9,39	45,34	43,81	67,04

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa; + - sem seleção devido a ausência de variabilidade genética

Segundo Wu et al. (2011), o índice EABN tem como principal característica a seleção de materiais que consigam manter alta produtividade em condições de estresse. Em relação à MHPR, Resende (2007a) argumenta que a mesma conduz a seleção simultânea para estabilidade e adaptabilidade. Em outras palavras, isto significa a seleção de plantas que mantenham sua produtividade em condições ideais e de estresse e que, em ambos os casos, estas produtividades estejam acima da média do ambiente.

Conceitualmente, a seleção via estes dois índices é semelhante, o que levaria a uma alta coincidência de seleção. No entanto, isto não foi verificado, sendo apenas pouco mais da metade dos materiais coincidentes (Tabela 7). Sendo assim, mesmo com propostas semelhantes, existe uma clara diferença na a forma como MHPR e EABN ordenam os genótipos.

2.2.4.2 Comparação entre as análises *single-trait* e *multi-trait*

Para a composição das metodologias *single-trait* e *multi-trait* de seleção simultânea o EAGN foi considerado como o indicador de eficiência no uso, e ITBN, considerado o indicador de tolerância ao estresse. É importante ressaltar que plantas tolerantes ao estresse possuem ITBN baixo, enquanto plantas eficientes possuem EAGN alto. Sendo assim, a existência de uma correlação positiva entre EAGN e ITBN traria problemas para a seleção, já que o aumento de EAGN implicaria no aumento de ITBN.

A partir dos valores genotípicos de EAGN e ITBN preditos de forma independente, (*single-trait*) o coeficiente de correlação de *Pearson* estimado entre eles foi de 0,69. Este resultado corrobora com a observação feita por Maia et al. (2011), de que eficiência e tolerância são inversamente proporcionais, ou seja, plantas tolerantes ao estresse tendem a não ser eficientes no uso de nitrogênio e vice-versa. Dessa forma, a seleção com base nos valores genotípicos preditos via análise *single-trait* fica prejudicada, visto a dificuldade em identificar genótipos simultaneamente favoráveis para EAGN e ITBN. Esta dificuldade fica bem clara quando se observa o gráfico da distribuição nos valores genotípicos. Nota-se a presença de poucos genótipos no quadrante IV (alto EAGN e baixo ITBN) (Figura 1).

Já a predição dos valores genotípicos de EAGN e ITBN em conjunto (*multi-trait*) obteve um coeficiente de correlação de *Pearson* de -0,96. Isto significa que o ajuste do valor genotípico das linhagens pela covariância existente entre os caracteres alterou a distribuição dos dados, tornando possível a visualização mais clara de quais materiais apresentam alto EAGN e baixo ITBN simultaneamente. Comparando os gráficos de distribuição dos valores genotípicos fica claro o impacto na mudança entre os métodos de predição e seleção dos indivíduos superiores (Figura 1).

Figura 1 – Análise Gráfica dos valores genotípicos de EAGN e ITBN preditos via método *single-trait* (a) e *multi-trait* (b)

A superioridade da análise *multi-trait* ainda pode ser observada comprando os valores de acurácia e herdabilidade obtidos, nos quais, houve um incremento em ambos os parâmetros (Tabela 5). Consequentemente, os ganhos de seleção da análise *multi-trait* foram bem superiores (Tabela 6). A expressiva mudança nos valores genotípicos dos materiais, além de ampliarem os ganhos com a seleção, possivelmente foi a responsável pela total coincidência de seleção entre as três metodologias, mostrando a capacidade da análise *muti-trait* em evidenciar os materiais que devem ser selecionados.

A escolha entre a seleção com a utilização dos valores preditos via *single-trait* e *muti-trait* é discutida por Bauer e León (2008). Segundo estes autores, caracteres inversamente correlacionados apresentam maiores ganhos simultâneos com a seleção utilizando os valores preditos via *muti-trait*. A seleção via *single-trait* para esses tipos de caracteres pode resultar em ganho para um caractere e perda para o outro. Já Viana et al. (2010), trabalhando com seleção simultânea para produtividade e capacidade de expansão em milho pipoca, afirmam que quando a herdabilidade das características é semelhante, a decisão entre usar *single-trait* ou *multi-trait* esta na diferença absoluta existente entre a correlação genética e a correlação residual. Caso ambas sejam próximas, haverá pouca diferença entre *single-trait* ou *multi-trait*. No entanto, Para EAGN e ITBN a diferença entre essas correções foi expressiva, levando a completa mudança na distribuição gráfica do valor genotípico as linhagens (Tabela 9).

Tabela 9 – Herdabilidade e correlação genética e residual entre os índices de resposta das plantas ao estresse EAGN e ITBN preditos via método *single-trait* e *multi-trait* em linhagens de milho tropical

Parâmetros	<i>Single-trait</i>		<i>Multi-trait</i>	
	EAGN	ITBN	EAGN	ITBN
Herdabilidade	0,09	0,06	0,15	0,26
Correlação genética	0,41		-0,54	
Correlação residual	0,61		0,90	

EAGN - Eficiência Agronômica do nitrogênio; ITBN - Índice de Tolerância a Baixa Disponibilidade e nitrogênio

2.2.4.3 Ranqueamento e seleção diferencial das metodologias

Apesar da análise *multi-trait* indicar ser superior a análise *single-trait*, o desempenho desta ficou muito aquém dos índices *per se* de seleção simultânea. Isto ocorreu devido ao fraco desempenho dos índices de resposta das plantas ao estresse usados nestas análises. A variabilidade genética de EAGN e ITBN foi baixa, refletindo no baixo valor de herdabilidade e acurácia. O aumento na acurácia quando os valores genotípicos foram preditos via análise *multi-trait* de fato ocorreu, corroborando a literatura citada, no entanto, a mesma ainda permaneceu muito baixa (Tabela 5).

Dessa forma, o baixo sucesso na seleção via metodologias que utilizaram EAGN e ITBN não reside na forma como os valores genotípicos destes foram estimados (*single-trait* e *multi-trait*), mas sim no desempenho *per se* dos próprios índices de resposta das plantas ao estresse. Estes índices de resposta são pouco acurados e não conduziram a seleção dos materiais mais produtivos nas condições de alto e baixo N. Diversas linhagens produtivas em ambas as condições deixaram de ser selecionadas (Figura 2).

O melhor desempenho dos índices *per se* é novamente confirmado quando se verifica os materiais a serem selecionados por eles e os ganhos com a seleção em cada ambiente. Houve uma clara priorização por linhagens produtivas em ambos os ambientes. Entretanto, é possível verificar diferenças na priorização entre EABN e MHPR. Mesmo EABN selecionando materiais produtivos em ambos os ambientes, há uma tendência deste em selecionar linhagens com maior produtividade em baixo N. Já para a MHPR, a seleção parece ser mais equilibrada, ou seja, seleciona aqueles de melhor desempenho simultâneo (Figura 2). Adicionalmente, a MHPR apresentou o maior ganho com a seleção nos cultivos com disponibilidade ideal e baixa disponibilidade de nitrogênio (Tabela 10).

Figura 2 – Linhagens a serem selecionadas nas metodologias de seleção simultânea consideradas em relação à produtividade obtida em disponibilidade ideal (PG AN) e baixa disponibilidade (PG BN) de nitrogênio

Em sua proposição, Wu et al. (2011) desenvolveu o EABN como sendo uma razão entre a produtividade na condição de estresse pela produtividade na condição ideal multiplicada pela condição de estresse. Observando a Figura 2, é possível notar que esta multiplicação leva a priorização deste índice por selecionar materiais mais produtivos na condição de estresse em detrimento a aqueles mais produtivos na condição ideal. Esta constatação é confirmada observando os resultados apresentados na Tabela 10, na qual, EABN obteve o menor ganho na condução de nitrogênio ideal.

O maior equilíbrio verificado em MHPR corrobora melhor com o objetivo deste estudo de seleção simultânea. Além disso, a MHPR superou EABN na seleção para a condição de estresse, a qual parece ser o ponto forte da seleção via EABN. Outra vantagem da MHPR é a possibilidade de considerar mais de dois ambientes, tornando possível a avaliação dos materiais em gradientes de estresse (RESENDE, 2007a). Estes preceitos, somados ao já citado desempenho superior deste em acurácia e herdabilidade, fazem da seleção *per se* via MHPR o melhor dentre os oito cenários propostos.

Tabela 10 – Ganhos com a seleção (GS%) para a produtividade de grãos de linhagens de milho tropical cultivadas em disponibilidade ideal (AN) e baixa disponibilidade (BN) de nitrogênio

Método de seleção	GS(%) AN	GS(%) BN
EABN	24.01	39.94
MHPR	34.01	41.04
Aditivo (<i>single-trait</i>)	31.64	32.84
Mulamba-Mock (<i>single-trait</i>)	27.89	31.80
Análise Gráfica (<i>single-trait</i>)	25.49	25.63
Aditivo (<i>multi-trait</i>)	31.64	32.84
Mulamba-Mock (<i>multi-trait</i>)	31.64	32.84
Análise Gráfica (<i>multi-trait</i>)	31.64	32.84

EABN - Eficiência Agronômica a Baixa Disponibilidade de Nitrogênio; MHPR - Média Harmônica da Performance Relativa

2.3 Conclusões

- A seleção simultânea de linhagens de milho tropical para tolerância ao estresse e eficiência no uso de nitrogênio é possível.
- A Média Harmônica da Performance Relativa (MHPR) é o mais indicado para a seleção simultânea de linhagens de milho tropical para tolerância ao estresse e eficiência no uso de nitrogênio.

Referências

- BAUER, A.M.; LÉON, J. Multiple-trait breeding values for parental selection in self-pollinating crops. **Theoretical and Applied Genetics**, Amsterdam, v. 116, p. 235-242, 2008.
- BERNARDO, R. Selection for multiple traits. In: _____. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury: Stemma Press, 2010. p. 323-336.
- BICUDO, S.J.; CRUZ, S.C.S.; PEREIRA, F.R.S.; BRACHTVOGEL, E.L.; MADALENA, J.A.S. Níveis de adubação para a cultura do milho safrinha. **Caatinga**, Mossoró, v. 22, p. 23-30. 2009.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 400-412.
- CRAWELL, E.T.; GODWIN, D.C. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates. In: TINKER, P.B.; LAUCHLI, A. **Advances in plant nutrition**, New York: Praeger Publ., 1984. v. 1, p. 1-55.
- DOVALE, J.C.; DELIMA, R.O.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G.V. Melhoramento para eficiência no uso de nitrogênio. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 81-99.
- DOVALE, J.C.; MAIA, C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G.V.; CAVATTE, P.C. Genetic responses of *traits* relationship to components of nitrogen and phosphorus use efficiency in maize. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 35, n. 1, p. 31-38, mar. 2013.
- EMBRAPA. **Cultivo do milho**. Disponível em: <www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejomilho.htm>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- GALLAIS, A.; HIREL, B. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, p. 295-306, Feb. 2004.
- GIÁCOMO, R.G.; PEREIRA, M.G.; GUARESCHI, R.F.; MACHADO, D.L. Atributos químicos e físicos do solo, estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em diferentes formações vegetais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 617-631, jul./set. 2015.
- GILMOUR, A.R.; GOGEL, B.J.; CULLIS, B.R.; THOMPSON, R. **ASReml user guide release 3.0**. Hemel Hempstead: VSN International, 2009. 398 p.
- MAIA, C.; DOVALE, J.C.; FRITSCHÉ-NETO, R.; CAVATTE, P.C.; MIRANDA, G.V. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 11, p. 270-275, 2011.
- MITI, F.; TONGOONA, P.; DERERA, J. S1 selection of local maize landraces for low soil nitrogen tolerance in Zambia. **African Journal of Plant Science**, Nairobi, v. 4, p. 67-81, Mar. 2010.

MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant *traits*. **Journal of Genetics and Cytology**, Alexandria, n. 7, p. 40-51, 1978.

PENG, Y.; YU, P.; LI, X.; LI, C. Determination of the critical soil mineral nitrogen concentration for maximizing maize grain yield. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 372, p. 41-51, 2013.

PETRÓLEO BRASILEIRO. **Análise do mercado de fertilizantes**. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/agrominerais/livros/AnaliseMercado.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

RESENDE, M.D.V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007a. 561 p.

_____. **Seleção-reml/blup: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos**. Colombo: Embrapa Florestas. 2007b. 359 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS, Comissão Química e Fertilidade do Solo, 2004. 394 p.

VIANA, J.M.S.; SOBREIRA, F.M.; DE RESENDE, M.D.V.; FARIA, V.R. *Multi-trait BLUP in half-sib selection of annual crops*. **Plant Breeding**, Malden, v. 129, p. 599-604, 2010.

WU, Y.; LIU, W.; LI, X.; LI, M.; ZHANG, D.; HAO, Z.; WENG, J.; XU, Y.; BAI, L.; ZHANG, S.; XIE, C. Low-nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbreds: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation. **Euphytica**, Amsterdam, v. 180, p. 281-290, 2011.

3 ACURÁCIA DA SELEÇÃO SIMULTÂNEA PARA PRECOCIDADE E PRODUTIVIDADE EM LINHAGENS DE MILHO TROPICAL

Resumo

O cultivo do milho entre de janeiro e março, logo após a colheita da safra de verão, é denominado milho segunda safra. Mesmo semeado em condições climáticas pouco favoráveis, muitos produtores vem obtendo sucesso com a cultura, fazendo com que a mesma ganhe importância. Este sucesso está diretamente relacionado com o tempo necessário para que a cultura atinja a maturidade fisiológica. Assim, a antecipação do plantio e o uso de híbridos precoces são as principais estratégias para minimizar o efeito do estresse sobre a estabilidade produtiva. No entanto, esta precocidade tem que estar associada com altas produtividades. Diante do exposto, o objetivo foi verificar a possibilidade de selecionar simultaneamente linhagens de milho tropical produtivas e precoces, além de verificar se há diferenças entre os métodos de seleção simultânea neste contexto. Para isto, 64 linhagens foram avaliadas em dois locais, para produtividade, dias para o florescimento feminino e umidade de grãos na colheita. Os valores genotípicos dos materiais para estes caracteres foram preditos por meio de equações de modelos mistos do tipo REML/BLUP *single-trait* (univariado) e *multi-trait* (multivariado). Em seguida, seis cenários de seleção simultânea foram considerados, sendo três métodos de seleção simultânea (Análise Gráfica, índice Aditivo e índice de Mulamba-Mock) a partir de dois métodos de predição dos valores genotípicos (REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*). Estes foram comparados quanto aos ganhos de seleção e a acurácia seletiva. Devido à baixa correlação entre as variáveis, o efeito da correção dos valores genotípicos pela covariância foi pequeno (*multi-trait*), não influenciado no ranqueamento em comparação com a predição *single-trait*. Assim, por ser de maior praticidade, a análise *single-trait* deve ser preconizada. Já o índice Aditivo, por possibilitar priorizar variáveis, foi o que obteve o maior ganho com a seleção para produtividade e, simultaneamente, obteve bons ganhos para dias para o florescimento feminino e umidade de grãos na colheita. Com isso conclui-se que o índice Aditivo, utilizando os valores genotípicos preditos via *single-trait*, é o melhor método de seleção simultânea para produtividade e precocidade em linhagens de milho tropical.

Palavras-chave: Milho segunda safra; Estresse abiótico; Modelos mistos; Correlação entre caracteres; Ganhos com a seleção

Abstract

The maize sowed between January and March in Brazil, shortly after summer crops harvest, is called second growing season maize. Despite being sown in unfavorable weather conditions, many farmers have been successful, making second growing season maize an important crop. This success is directly related to the time required for the maize reach physiological maturity. Thus, the sowing anticipation and early hybrids are the mains strategies to reduce the stress effect on yield stability. However, this earliness must be associated with high yield. Thus, the objective was to investigate the possibility of simultaneous selection to yield and earliness for tropical maize lines, and check the differences between the simultaneous selection methods in this case. For this, 64 lines were evaluated in two locations for grain yield, days to female flowering and grain moisture at harvest. The lines genotypic values for these traits were predicted using mixed model

equations REML/BLUP single-trait (univariate) and multi-trait (multivariate). Then, six simultaneous selection sets were considered, using three simultaneous selection methods (Graphic Analysis, Additive index and Mulamba-Mock index) from two prediction methods of genotypic values (REML/BLUP single-trait and multi-trait). These were compared for the selection gains and accuracy. Due to the low correlation between these traits, the correction effect in the genotypic values by the covariance was low (multi-trait), not influenced in the ranking compared to the single-trait prediction values. Thus, due to the practicality of the single-trait analysis, it should be prioritized. The Additive index got the highest selection gain for grain yield. Simultaneously, Additive index achieved good gains for days to female flowering and grain moisture at harvest. Thus, it is concluded that the Additive index, using the single-trait predicted genotypic values, is the best simultaneous selection method for yield and earliness in tropical maize lines.

Keywords: Second growing season maize; Abiotic stress; Mixed models; Correlation between traits; Selection gains

3.1 Introdução

O Cultivo do milho logo após a colheita da safra de verão, é denominado milho segunda safra. Esta modalidade vem crescendo no país desde seu início nos anos 1970, quando se buscava uma alternativa rentável às culturas de inverno (DUARTE, 2008). Desde então, mesmo semeado em condições climáticas pouco favoráveis, muitos produtores obtiveram resultados satisfatórios com a cultura, fazendo com que esta ganhasse importância. Prova disto é que foram cultivados no Brasil, na safra 2013/2014, 9,18 milhões de hectares de milho segunda safra, enquanto o milho primeira safra atingiu 6,61 milhões de hectares. A evolução deste cultivo também pode ser observada pela produtividade média, a qual no início não ultrapassava os 2.000 kg ha⁻¹ e hoje é de 5.200 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015).

O desenvolvimento do milho segunda safra é desfavorecido por uma série de fatores climáticos, como frio intenso, geadas, déficit hídrico e redução do fotoperíodo, o que eleva o risco de perdas na produtividade. Neste contexto, a obtenção de bons resultados está diretamente relacionada com a antecedência na qual, a cultura atinge a maturidade fisiológica. Assim, a antecipação do plantio e o uso de híbridos precoces são as principais estratégias para minimizar as perdas que ocorrem neste período (GALVÃO; TROGELLO; PEREIRA, 2015).

Segundo Cruz et al. (2011), mesmo com a antecipação da colheita da cultura de verão por meio de dessecação ou plantio de cultivares precoces, 74% dos híbridos de milho cultivados na segunda safra são de ciclo precoce. A utilização destes melhora a logística de plantio, uma vez que estes ficarão menos expostos às condições adversas do período. No entanto, apesar da importância em reduzir o ciclo dos materiais, no momento da seleção deve-se atentar também para a correlação entre produtividade e precocidade. Neste sentido, Magalhães et al. (2002), além de Taiz e Zeiger (2013) descrevem que estes caracteres tem

correlação negativa entre si, devido à competição entre os mecanismos filológicos que conferem produtividade e precocidade na planta de milho. Com isso, faz-se necessário o uso de seleção simultânea para evitar perdas de produtividade nos novos híbridos de ciclo precoce.

Para a avaliação de precocidade, Hallauer, Carena e Miranda Filho (2010) citam dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita como bons caracteres para se praticar seleção. Ambos possuem herdabilidade média (cerca de 60%) e predominância de efeitos aditivos. Deste modo, a seleção pode ser realizada em linhagens per se para posterior produção de híbridos. Além disso, mesmo havendo uma correlação entre dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita, a utilização de ambas as variáveis se justifica uma vez que há um efeito diferencial na velocidade de perda de umidade dos grãos após a maturação fisiológica (KANG et al., 2005).

Sendo assim, a seleção simultânea de precocidade de produtividade pode ser realizada a partir dos caracteres de produtividade de grão, dias para o florescimento feminino e umidade de grãos na colheita, sendo o interesse elevar o primeiro e reduzir o segundo. Como estes caracteres possuem correlação negativa (MAGALHÃES et al., 2002), a utilização de métodos de seleção simultânea, como índices de seleção e a análise gráfica são recomendadas (BERNARDO, 2010). Adicionalmente, os valores genotípicos dos materiais, além de serem preditos de forma univariada (REML/BLUP *single-trait*), também podem ser preditos de forma multivariada (REML/BLUP *multi-trait*). Neste, a predição dos valores genotípicos considera a covariância existente entre os caracteres. (VIANA et al., 2010). Assim, este método de predição pode levar a seleção mais acurada dos caracteres em estudo.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Objetivos

3.2.1.1 Objetivo geral

Verificar a acurácia da seleção simultânea para precocidade e produtividade em linhagens de milho tropical.

3.2.1.2 Objetivos específicos

- Selecionar simultaneamente linhagens de milho tropical precoces e produtivas, a fim de serem utilizadas para a produção de híbridos adaptados às condições de cultivo de segunda safra.

- Identificar se há diferenças entre os métodos de seleção simultânea para produtividade e precocidade em linhagem de milho tropical.

3.2.2 Material e métodos

3.2.2.1 Multiplicação das linhagens de milho tropical

Foi realizada a multiplicação de sementes de sessenta e quatro linhagens de milho tropical com o objetivo de obter sementes suficientes e com boa taxa de germinação para a implantação dos experimentos deste estudo. As parcelas foram constituídas de linhas de quatro metros de comprimento, espaçadas de 0,85 metros entre linhas e 0,20 metros entre plantas, com 20 sementes por linha. Os tratos culturais e o manejo foram realizados conforme recomendado para a cultura do milho (EMBRAPA, 2014). Esta etapa foi realizada na área experimental do Departamento de Genética da ESALQ/USP, em Piracicaba – SP (22°42'23"S, 47°38'14"W, 535h).

3.2.2.2 Instalação e condução dos experimentos no campo

As sessenta e quatro linhagens foram avaliadas em dois locais, na Estação Experimental de Anhembi, pertencente a ESALQ/USP em Anhembi – SP (22°50'51.96"S, 48°01'06"W, 466h) e no campo experimental do Departamento de Genética da ESALQ/USP em Piracicaba – SP, na segunda safra de 2015. Nestes, o delineamento experimental foi o látice simples (8x8), com duas repetições. Cada parcela foi constituída de uma linha de cinco metros com espaçamento entre linhas de 0,80 metros e entre plantas de 0,20 metros.

A adubação foi constituída de 300 kg ha⁻¹ do formulado NPK 4-14-8. Foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N, sendo 12 kg aplicados no plantio e o restante em duas adubações iguais de cobertura, aos 30 dias (V6) e 50 dias após o plantio (VT). O manejo e os tratos culturais foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados para a cultura do milho (EMBRAPA, 2014).

3.2.2.3 Caracteres avaliados

Durante o desenvolvimento da cultura, foram amostradas as datas de florescimento masculino (50% das plantas da parcela emitindo pólen) e feminino (50% das plantas da parcela com emissão de estilo-estigma). Além disso, foi avaliado o estande (número de plantas na parcela no estágio de maturação fisiológica). Em seguida, após a colheita, foram coletados os dados de produtividade de grãos (PG) em kg ha⁻¹ e de umidade de grãos em (%).

Por meio desses dados, a produtividade foi corrigida para unidade de grãos com base seca a 13%. A correção da produtividade com base no estande não foi necessária, já que as linhagens apresentaram diferença significativa para o mesmo.

Dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos no momento da colheita (Ucol) foram utilizados como indicadores de precocidade, em que quanto menor seus valores, mais precoce é a planta. Por fim, estas duas variáveis juntamente com produtividade foram utilizadas nos índices de seleção simultânea.

3.2.2.4 Análise de deviance e equações de modelos mistos

Após a obtenção das avaliações de produtividade, dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita para cada repetição de cada linhagem, os dados foram submetidos a análise de deviance (ANADEV) por meio do pacote ASReml-R® (GILMOUR et al., 2009) do software R (R CORE TEAM, 2014). Também foram estimados os componentes de variância e os valores genotípicos das linhagens para cada índice por meio do método da Máxima Verossimilhança Restrita/Melhor Preditor Linear Não-viesado (REML/BLUP), conforme descrito por Resende (2007):

$$y = Xr + Zg + Wb + Ti + \varepsilon$$

em que, y é o vetor de observações (produtividade, dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita); r é o vetor do efeito de repetição somados à media geral, considerado como fixo, em que $r \sim N(r, \Phi r)$; g é o vetor do efeito de linhagem, considerado como aleatório, em que $g \sim N(0, G)$; b é o vetor do efeito de bloco dentro de repetição, considerado como aleatório, em que $b \sim N(0, \sigma_b^2)$; i é o vetor do efeito da interação linhagem x local, considerado como aleatório, em que $i \sim N(0, \sigma_i^2)$; ε é o erro experimental. X , Z , W e T são matrizes de incidência que relacionam os efeitos dos vetores independentes de cada matriz ao vetor dependente y .

Foram preditos os valores genotípicos das linhagens para as variáveis por meio do REML/BLUP *single-trait* (análise univariada) e *multi-trait* (análise multivariada). Assim, as equações de modelos mistos (REML/BLUP) de ambas as situações de predição foram:

$$\begin{bmatrix} X'R^{-1}X & X'R^{-1}Z & X'R^{-1}W & X'R^{-1}T \\ Z'R^{-1}X & Z'R^{-1}Z + G_1 & Z'R^{-1}W & Z'R^{-1}T \\ W'R^{-1}X & W'R^{-1}Z & W'R^{-1}W + G_2 & W'R^{-1}T \\ T'R^{-1}X & T'R^{-1}Z & T'R^{-1}W & T'R^{-1}T + G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'R^{-1}y \\ Z'R^{-1}y \\ W'R^{-1}y \\ T'R^{-1}y \end{bmatrix}$$

em que para o *single-trait*, tem-se:

$$R = I_{(n1)}\sigma_e^2; G_1 = I_{(n2)}\sigma_g^2; G_2 = I_{(n3)}\sigma_b^2; G_3 = I_{(n4)}\sigma_i^2$$

em que, I é uma matriz identidade de dimensões n_1 (repetições x locais x linhagens), n_2 (linhagens), n_3 (blocos x repetições x locais) e n_4 (linhagens x locais); σ_e^2 , σ_g^2 , σ_b^2 e σ_i^2 são, respectivamente, os componentes de variância residual, variância genética, variância de bloco e variância da interação linhagem x local.

Para o *multi-trait*, tem-se:

$$R = I_{(n1)} \otimes Cov_e; G_1 = I_{(n2)} \otimes Cov_g; G_2 = I_{(n3)} \otimes Cov_b; G_3 = I_{(n4)} \otimes Cov_i$$

em que, I é uma matriz identidade de dimensões n_1 (repetições x locais x linhagens), n_2 (linhagens), n_3 (blocos x repetições x locais) e n_4 (linhagens x locais); Cov_e , Cov_g , Cov_b e Cov_i são, respectivamente, as matrizes de variâncias e covariâncias residual, genética, de bloco e da interação linhagem x local, entre as duas variáveis analisadas (PG, Flor, Ucol); $\otimes$ indica o produto Kronecker.

3.2.2.5 Métodos de seleção simultânea

Após a obtenção dos valores genotípicos das sessenta e quatro linhagens para produtividade, dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita por meio dos métodos REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*, foram aplicados os diferentes cenários de seleção simultânea. Para isto, foram considerados, em um esquema fatorial (2x3), seis cenários de seleção simultânea, sendo dois métodos de predição de valores genotípicos (REML/BLUP *single-trait* e *multi-trait*) e três métodos de seleção simultânea (índice Aditivo de seleção, índice de Mulamba-Mock e seleção por Análise Gráfica).

3.2.2.5.1 Índice Aditivo de seleção (IAD)

Proposto por Resende (2007), este índice seleciona simultaneamente com base nos valores genotípicos obtidos para produtividade, dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita. O mesmo foi estimado pela seguinte equação:

$$IAD_i = b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i}$$

em que, IAD_i é o valor do índice Aditivo de seleção para a linhagem i ; b_1 representa o peso econômico da variável produtividade; b_2 representa o peso econômico da variável dias para florescimento feminino; b_3 representa o peso econômico da variável umidade de grãos na colheita; X_{1i} é o valor genotípico da variável produtividade na linhagem i ; X_{2i} é o valor genotípico da variável dias para florescimento feminino na linhagem i ; X_{3i} é o valor genotípico da variável umidade de grãos na colheita na linhagem i .

Os pesos econômicos atribuídos foram: 0,5 para produtividade; 0,25 para dias para florescimento feminino; e 0,25 para umidade de grãos na colheita. Devido a diferença de magnitude entre os valores genotípicos das linhagens para as três variáveis, foi realizada a padronização da média, dividindo os valores observados pelo desvio padrão da característica. Adicionalmente, os valores genotípicos de Flor e Ucol foram multiplicados por menos um (-1), já que o objetivo foi selecionar com base na redução do valor genotípico destes.

3.2.2.5.2 Índice de Mulamba-Mock (IMM)

O índice proposto por Mulamba e Mock (1978) não utilização de variâncias e covariâncias entre as variáveis, além da atribuição de pesos econômicos. Este se baseia na soma de postos ou ranques dos indivíduos para as diferentes variáveis em seleção. Sendo assim, após o ranqueamento individual para cada característica, o ranque médio dos materiais foi estimado pela seguinte fórmula:

$$IMM_i = \frac{P_{1i} + P_{2i} + P_{3i}}{3}$$

em que, IMM_i é o valor do índice seleção de Mulamba-Mock para a linhagem i ; P_{1i} é a posição da linhagem i no ranque de produtividade; P_{2i} é a posição da linhagem i no ranque de

dias para florescimento feminino; e P_{3i} é a posição da linhagem i no ranque de umidade de grãos na colheita.

Após a obtenção dos valores das linhagens para este índice, um novo ranqueamento foi feito, sendo selecionadas as melhores posicionadas.

3.2.2.5.3 Seleção via Análise Gráfica (AGR)

A seleção foi feita atribuindo a cada eixo do plano cartesiano os valores genotípicos das linhagens para produtividade, dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita. Como para uma análise visual simples são possíveis apenas duas variáveis por vez, foram construídos gráficos com todas as combinações de variáveis, sendo selecionados aqueles materiais coincidentes nos quadrantes favoráveis nos três gráficos.

3.2.2.6 Comparação dos métodos de seleção simultânea

Após a obtenção dos valores genotípicos das sessenta e quatro linhagens para cada um dos seis cenários de seleção simultânea, foi simulada a seleção de 10% das linhagens superiores. As diferentes estratégias de seleção simultânea foram comparadas entre si em função dos valores estimados de ganhos com seleção e acurácia seletiva:

$$GS(\%) = \frac{\left(\frac{\sum_i^n VG_{ij}}{n} \right)}{\bar{x}_j} \times 100 \quad \text{e} \quad \hat{r} = \left[1 - \frac{1}{1 + b \cdot \left(\frac{CVg^2}{CVe^2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

em que, $GS(\%)$ é o ganho de seleção esperado em porcentagem; VG_{ij} é o valor genotípico da linhagem selecionada i para a variável j ; n é o número de indivíduos selecionados; $\bar{x}_j$ é a média geral da variável j ; $\hat{r}$ é a acurácia seletiva; b é o número de repetições do delineamento; CVg^2 é o coeficiente de variação genético; CVe^2 é o coeficiente de variação residual.

3.2.3 Resultados

3.2.3.1 Análise de Deviance e parâmetros dos caracteres de seleção

Pela análise de Deviance via método *single-trait* foi possível identificar diferenças significativas entre as linhagens para as três características avaliadas. Notou-se também o efeito significativo de ambiente e interação linhagem x ambiente para produtividade e umidade de grãos na colheita. O mesmo não ocorreu em dias para florescimento feminino, evidenciando a estabilidade desta característica às variações das condições ambientais (Tabela 11).

Apesar do efeito da interação ter sido significativo, a seleção dos materiais foi realizada considerando a média de todos os ambientes, minimizando esta, pois se preconiza no milho segunda safra o desenvolvimento de materiais estáveis nos diversos locais.

Tabela 11 – Teste de Wald para os efeitos fixos e de LRT para os efeitos aleatórios, estimados via REML/BLUP *single-trait* para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol) em linhagens de milho tropical

Fator de variação	PG	Flor	Ucol
<i>Efeitos Fixos</i>			
Ambiente	29,10 ^{**}	17,8 ^{**}	8,81 ^{**}
Repetição/Ambiente	8,40 [*]	1,8 ^{ns}	11,38 ^{**}
<i>Efeitos Aleatórios</i>			
Bloco/Repetição	2,50 ^{ns}	0,01 ^{ns}	6,41 [*]
Linhagem	67,27 ^{**}	143,95 ^{**}	63,02 ^{**}
Linhagem x Ambiente	7,96 ^{**}	3,42 ^{ns}	5,60 [*]

LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT ou F Wald; ** - significativo a 1% pela LRT ou F Wald

Analogamente, pela análise de Deviance via método *multi-trait* a maioria dos efeitos do modelo foram significativos. Vale destacar que esta significância ocorreu devido aos efeitos testados por este modelo serem a interação entre os efeitos equivalentes nas análises individuais com os caracteres analisados (Tabela 12).

Tabela 12 – Teste de Wald para os efeitos fixos e de LRT para os efeitos aleatórios, estimados via REML/BLUP *multi-trait* para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol) em linhagens de milho tropical

Fator de variação	Testes estatísticos
<i>Efeitos Fixos</i>	F Wald
Caractere	38380,00 ^{**}
Caractere x Ambiente	76,00 ^{**}
Caractere x Repetição/Ambiente	23,00 ^{**}
<i>Efeitos Aleatórios</i>	LTR
Caractere x Bloco/Repetição	0,83 ^{ns}
Caractere x Linhagem	231,39 ^{**}
Caractere x Linhagem x Ambiente	5,03 [*]

LRT - Likelihood-ratio test; ns - não significativo; * - significativo a 5% pela LRT ou F Wald; ** - significativo a 1% pela LRT ou F Wald

Em relação aos parâmetros de comparação, para todos os caracteres analisados foram observados valores de herdabilidade e acurácia satisfatórios. Como esperado, foi possível notar uma correlação entre a magnitude das estimativas destes parâmetros e o efeito que o ambiente tem em cada um dos caracteres avaliados. Assim, dias para florescimento feminino apresentou o maior valor de acurácia e herdabilidade, além o menor coeficiente de variação experimental (CV%). Umidade de grãos na colheita e produtividade tiveram desempenhos semelhantes em relação a acurácia e herdabilidade, no entanto, a produtividade apresentou um CV(%) superior (Tabela 13).

Comparando os valores dos parâmetros estimados pelos dois métodos de predição, verificou-se estabilidade da média, aumento nos valores do CV(%) e da herdabilidade. Além disso, houve uma leve redução da acurácia pelo uso do método *multi-trait* em comparação com a análise *single-trait* (Tabela 13).

Tabela 13 – Parâmetros genéticos estimados via método *single-trait* e *multi-trait* em linhagens de milho tropical para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol)

Parâmetros	<i>Single-trait</i>			<i>Multi-trait</i>		
	PG	Flor	Ucolh	PG	Flor	Ucolh
Média ($\bar{x}$)	1957,22	61,18	14,27	1957,22	61,18	14,27
Coeficiente de variação (CV%)	32,98	2,83	17,84	37,50	2,82	12,10
Herdabilidade (h ²)	0,68	0,86	0,68	0,78	0,90	0,77
Acurácia ($\hat{r}$)	0,81	0,91	0,80	0,80	0,90	0,79

3.2.3.2 Ganhos com a seleção

Foram estimados os ganhos diretos e indiretos com a seleção não apenas para os três métodos de seleção simultânea, mas também os ganhos diretos e indiretos com base na

seleção dos caracteres *per se*. Considerando os valores genotípicos obtidos via análise *single-trait*, notou-se que a seleção com base em produtividade leva a pequenos ganhos na redução do tempo de florescimento feminino e umidade de grãos na colheita. Em relação ao *multi-trait* houve um ganho negativo em dias para florescimento feminino, ou seja, a seleção para produtividade via este modelo, leva ao aumento do tempo para o florescimento feminino. Já se a seleção fosse feita com base no tempo para florescimento feminino, tanto via *single-trait* quanto *multi-trait*, seriam obtidos ganhos satisfatório em produtividade e excelentes em umidade de grãos na colheita. Por outro lado, considerando a seleção com base em umidade de grãos na colheita, os ganhos para produtividade seriam negativos, mas com ganhos positivos e de alta magnitude para tempo para o florescimento feminino (Tabela 14).

Estes resultados reiteram que há uma correlação genética positiva entre dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita, uma vez que a seleção baseada em um deles leva a ganhos indiretos no outro (Tabela 17). No entanto, a seleção com base nestas duas características não conduziu a ganhos satisfatórios de produtividade. Em situações como esta, as metodologias de seleção simultânea são mais recomendadas do que a seleção de apenas um caractere (BERNARDO, 2010).

Neste sentido, pôde-se observar que as metodologias de seleção simultânea obtiveram ganhos positivos simultâneos em todas as características em estudo. O índice Aditivo foi o que obteve os maiores ganhos em produtividade. Já em dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita, o índice de Mulamba-Mock foi o que apresentou os maiores ganhos (Tabela 14). Comparando os ganhos entre as análises *single-trait* e *multi-trait* notou-se pequena variação nas estimativas. Estas variações se deram devido a pequenas mudanças no ajuste dos dados em cada análise, já que cada método de seleção simultânea selecionou os mesmos materiais na análise *single-trait* e *multi-trait* (Tabela 15). Assim, as diferenças são significantes apenas entre os métodos de seleção simultânea e não entre os métodos de predição dos valores genotípicos (Tabela 18).

Tabela 14 – Ganhos diretos e indiretos com a seleção (%) para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol), obtidos pelos índices Aditivo, Mulamba-Mock e Análise Gráfica utilizando os valores genotípicos preditos pelos métodos *single-trait* e *multi-trait* em linhagens de milho tropical

Métodos de seleção	<i>Single-trait</i>				<i>Multi-trait</i>			
	Direto	Indireto			Direto	Indireto		
		PG	Flor	Ucolh		PG	Flor	Ucolh
PG	53,79	-	0,59	2,22	51,29	-	-0,49	1,57
Flor	6,19	5,94	-	11,33	6,03	11,29	-	18,01
Ucolh	20,12	-4,74	3,02	-	21,13	-14,58	4,40	-
Aditivo	17,17	46,01	3,23	8,18	17,05	43,06	3,11	9,10
Mulamba-Rank	60,88	24,57	5,51	14,40	64,40	22,25	5,41	17,08
Análise Gráfica	-	34,49	3,82	9,59	-	29,05	4,13	11,03

Tabela 15 – Coincidência de linhagens a serem selecionadas nos diferentes métodos de seleção simultânea considerados e dois métodos de predição dos valores genotípicos (*single-trait* e *multi-trait*)

Métodos de seleção	<i>Single-trait</i>			<i>Multi-trait</i>		
	IAD	IMM	AGR	IAD	IMM	AGR
<i>Single-trait</i>						
IAD	-	71%	57%	100%	86%	57%
IMM		-	57%	71%	100%	57%
AGR			-	57%	57%	100%
<i>Multi-trait</i>						
IAD	-	71%	57%			
IMM		-	57%			
AGR			-			

IAD – Índice Aditivo; IMM - Índice de Mulamba-Mock; AGR - Análise Gráfica

3.2.4 Discussão

3.2.4.1 Desempenho e correlação entre os caracteres e métodos de predição dos valores genotípicos

Em ambos os métodos de predição (*single-trait* e *multi-trait*) os valores de acurácia, herdabilidade e CV(%) foram satisfatórios para os três caracteres em estudo. Dias para florescimento feminino obteve a maior herdabilidade, reiterando os resultados relatados por Hallauer, Carena e Miranda Filho (2010). Além disso, o mesmo se mostrou estável ao efeito do ambiente, visto a ausência de interação linhagem x ambiente. Por outro lado, a produtividade apresentou a menor herdabilidade. Ainda segundo estes autores, por ser um caráter poligênico, a produtividade de grãos apresenta elevada interferência do ambiente. No entanto, a herdabilidade observada neste estudo pode ser considerada alta para este caractere (Tabela 13).

Houve uma elevação na magnitude dos valores de CV(%) e herdabilidade para produtividade e umidade de grãos na colheita pelo método *multi-trait* em relação ao *single-*

trait. Isto ocorreu devido ao inflacionamento nos componentes de variância genético e residual (dados não apresentados). Balastre et al. (2013), trabalhando com seleção simultânea para produtividade e tipo de grão, verificou o mesmo fenômeno. No entanto, a estabilidade no valor da acurácia indica que este inflacionamento foi proporcional no componente genético e residual, de modo que esta mudança pouco influenciou o ranqueamento final dos materiais e a seleção.

Segundo Viana et al. (2010), para que haja maior eficácia da análise *multi-trait*, deve-se observar a correlação existente entre os caracteres. Assim, para caracteres não correlacionados ou que as correlações genéticas e residuais sejam próximas, este método apresenta ganhos similares ao *single-trait*. Estas condições são observadas em duas das três combinações entre os caracteres deste estudo (Tabelas 16 e 17).

Tabela 16 – Coeficiente de correlação de *Pearson* para o desempenho das linhagens de milho tropical para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol)

Caracteres	PG	Flor	Ucol
PG	-	-0,09 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Flor	-	-	0,45 ^{**}
Ucol	-	-	-

ns - não significativo; ** - significativo a 1% de significância pelo teste de correlação de *Pearson*

Tabela 17 – Correlação genética e residual entre as linhagens de milho tropical para produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol) via método *single-trait* e *multi-trait* de predição dos valores genotípicos

Parâmetros	PG x Flor	PG x Ucol	Flor x Ucol
<i>Single-trait</i>			
Correlação Genética	-0,11	0,06	0,77
Correlação residual	-0,21	-0,05	0,37
<i>Multi-trait</i>			
Correlação Genética	-0,10	0,10	0,77
Correlação residual	-0,24	0,12	0,11

Pôde-se observar também que entre produtividade de grãos e dias para o florescimento feminino, assim como entre produtividade de grãos e umidade de grãos na colheita, não houve correlação significativa. Além disso, as correlações genéticas e residuais destes foram próximas. Apenas dias para florescimento feminino e umidade de grãos na colheita apresentam correlação positiva significativa entre si, além de correlações genéticas e residuais com magnitudes elevadas (Tabela 17). Como estes dois caracteres são diretamente correlacionados, o ganho em um leva ao ganho no outro. Nesta condição, segundo Bauer e Léon (2008), a utilização do *multi-trait* pode ser dispensada, já que a correção dos valores genotípicos não leva a alteração do ranqueamento dos genótipos.

Notou-se a ausência de mudanças significativas nos valores genotípicos dos indivíduos a serem selecionados comparando os gráficos de produtividade de grão x dias para o florescimento feminino, além de produtividade de grãos x umidade de grãos na colheita. Já na Análise Gráfica de dias para florescimento feminino x umidade de grãos na colheita foi possível observar o efeito do ajuste pela covariância nos valores genotípicos dos indivíduos (Figura 3). No entanto, este não foi intenso o suficiente para alterar os indivíduos a serem selecionados. Nesta figura, os quadrantes de seleção são: IV para a.1, a.2, b.1, e b.2; e III para c.1 e c.2.

Figura 3 – Análise Gráfica dos valores genotípicos (VG) para produtividade de grãos (PG), dias para florescimento feminino (Flor) e unidade de grãos na colheita (Ucol), via método *single-trait* (a.1, b.1, c.1) e *multi-trait* (a.2, b.2, c.2)

3.2.4.2 Comparação entre as metodologias de seleção

A invariância dos indivíduos a serem selecionados entre os métodos *single-trait* e *muti-trait*, nos diferentes caracteres avaliados, foi consequência das correlações existente entre eles. Para duas das três combinações de caracteres tem-se ausência de correlação (PG x Flor e PG x Ucol), o que fez com que o ajuste dos valores genotípicos dos indivíduos pela covariância seja pequeno. Para Flor x Ucol, mesmo com correlação significativa, não houve alteração dos indivíduos a serem selecionados devido ao sentido (positivo) desta correlação.

Dessa forma, pôde-se constatar que a seleção simultânea para estes três caracteres dispensa a utilização da predição *multi-trait*, uma vez que não há um efeito significativo na mudança dos valores genotípicos, nem mudança no ranqueamento dos indivíduos (Tabela 18). A análise *multi-trait* tem maior demanda computacional, além de dificuldades na convergência quando há muitos componentes de variância a serem preditos (GILMOUR et al., 2009). Assim, por não haver diferença nos indivíduos a serem selecionados, uma análise mais simples e fácil de ser executada é preferível.

Em relação aos métodos de seleção simultânea, a Análise Gráfica é considerada uma metodologia de difícil aplicação para a seleção de mais de dois caracteres simultâneos, visto a dificuldade em localizar materiais coincidentes em todos os quadrantes de seleção. Neste contexto, Bernardo et al. (2010), recomenda a Análise Gráfica apenas para a seleção simultânea de dois caracteres. Já o índice de Mulamba-Mock, assim como a Análise Gráfica, por não priorizarem variáveis, possibilitaram ganhos equilibrados (Tabelas 14 e 19). Resultado semelhante foi observado por Nick et al. (2013) que, trabalhando com progênies de tomateiro, obteve ganhos simultâneos satisfatórios para tolerância a doenças e qualidade de fruto. No entanto, tolerância e qualidade eram caracteres de igual importância no estudo.

Por outro lado, para casos em que uma das variáveis deve ser preconizada, o índice Aditivo obtém vantagem, uma vez que, priorizando a produtividade, este índice apresentou o maior ganho para esta variável, além de ganhos satisfatórios para os demais caracteres (Tabelas 14 e 19). Corroborando com este resultado, Jahufer e Casler (2015), estudando a seleção de diversos caracteres em *Panicum* spp. concluíram que o índice com atribuição de pesos econômicos é ideal quando se deseja modular os ganhos de forma diferencial. Adicionalmente, os autores comentam sobre versatilidade deste índice, podendo ser utilizado para atingir diferentes resultados dependendo dos pesos econômicos atribuídos.

Por fim, é possível observar pelo gráfico dos indivíduos a serem selecionados em cada cenário considerado que o índice Aditivo, mesmo priorizando produtividade, apresentou o

melhor balanço entre as três variáveis em relação aos ganhos com a seleção. Pode-se observar também que a Análise Gráfica e o índice de Mulamba-Mock levou a seleção de alguns materiais pouco produtivos (Figura 4), o que por ser temerário no melhoramento de milho segunda safra.

Tabela 18 – Análise de variância para os efeitos de métodos de predição dos valores genotípicos (*single-trait* e *multi-trait*) e métodos de seleção simultânea (índice Aditivo, índice de Mulamba-Mock e Análise Gráfica) considerando produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol) em linhagens de milho tropical

Fator de variação	PG	Flor	Ucol
Método de predição	14,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}	10,36 ^{ns}
Método de seleção	116,33 [*]	91,65 [*]	67,42 [*]

ns – não significativo; * – significativo 0,05 de probabilidade pelo teste F

Tabela 19 – Teste de comparação de médias de Tukey entre os métodos de seleção simultânea para o ganho de seleção (%) em produtividade de grãos (PG), dias para o florescimento feminino (Flor) e umidade de grãos na colheita (Ucol) em linhagens de milho tropical

Método de seleção	PG [*]	Flor [*]	Ucol [*]
Aditivo	44,54 a	3,17 b	8,64 b
Mulamba-Mock	23,41 c	5,46 a	15,74 a
Análise Gráfica	31,77 b	3,98 b	10,31 b

* – médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Figura 4 – Linhagens a serem selecionadas considerando os caracteres *per se* (produtividade, dias para o florescimento feminino e umidade de grãos na colheita) e as diferentes metodologias de seleção simultânea (índice Aditivo, índice de Mulamba-Mock e Análise Gráfica)

3.3 Conclusões

- A seleção simultânea de linhagens de milho tropical para produtividade e precocidade é possível.
- O índice Aditivo de seleção utilizando os valores genotípicos preditos via REML/BLUP *single-trait* é o mais indicado para a seleção simultânea de linhagens de milho tropical para produtividade e precocidade.

Referências

- BALASTRE, M.; TORGA, P.P.; VON PINHO, R.G.; SANTOS, J.B. Applications of *multi-trait* selection in common bean using real and simulated experiments. **Euphytica**, Amsterdam, v. 189, p. 225-238, 2013.
- BAUER, A.M.; LÉON, J. Multiple-trait breeding values for parental selection in self-pollinating crops. **Theoretical and Applied Genetics**, Amsterdam, v. 116, p. 235-242, 2008.
- BERNARDO, R. Selection for multiple *traits*. In: _____. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury: Stemma Press, 2010. p. 323-336.
- COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**. v. 2: safra 2014/15 n. 4 - Quarto levantamento. Brasília, 2015. 95 p.
- CRUZ, J.C.; SILVA, G.H.; PEREIRA FILHO, I.A.; GONTIJO NETO, M.M.; MAGALHÃES, P. C. **Sistema de produção de milho safrinha de alta produtividade: safras 2008 e 2009**. Sete Lagoas: Embrapa, 2011. 10 p.
- DUARTE, A.P. Milho safrinha: características e sistema de produção. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa: UFV, 2008. p. 109-138.
- EMBRAPA. **Cultivo do milho**. Disponível em: <www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejomilho.htm>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- GALVÃO, J.C.C.; TROGELLO, E.; PEREIRA, L.P.L. Milho segunda safra. In: BORÉM, A.; GALVÃO, J.C.C.; PIMENTEL, M.A. **Milho do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2015. p. 207-223.
- GILMOUR, A.R.; GOGEL, B.J.; CULLIS, B.R.; THOMPSON, R.; BUTLER, D. **ASReml user guide release 3.0**. Hemel Hempstead: VSN International, 2009. 398 p.
- HALLAUER, A.R.; CARENA, M.J.; MIRANDA FILHO, J.B. Hereditary variance: experimental estimates. In: _____. **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. p. 169-221.

JAHUFER, M.Z.Z.; CASLER, M.D. Application of the Smith-Hazel selection index for improving biomass yield and quality of Switchgrass. **Crop Science**, Madison, v. 55, p. 1212-1222, May/June 2015.

KANG, M.S.; BOARD, J.E.; AMINHA, N.; ZHANG, Y.; MORENO, O.J.; BALZARINI, M.G. Diallel analysis of ear moisture loss rate, SPAD chlorophyll, and harvest index in maize with the leafy (Lfy) gene. **Journal of New Seeds**, London, v. 7, n. 2, p. 1-16, 2005.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; CARNEIRO, N.P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2002. 23 p.

MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant *traits*. **Journal of Genetics and Cytology**, Alexandria, n. 7, p. 40-51, 1978.

NICK, C.; LAURINDO, B.S.; ALMEIDA, V.S.; FREITAS, R.D.; AGUILERA, J.G.; SILVA, E.C.F.; CRUZ, C.D.; SILVA, D.J.H. Seleção simultânea para qualidade do fruto e resistência à requeima em progênies de tomateiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 1, p. 59-65, jan. 2013.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

RESENDE, M.D.V. **Selegen-reml/blup**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas. 2007. 359 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Respostas e adaptações ao estresse abiótico. In: _____. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. p. 753-780.

VIANA, J.M.S.; SOBREIRA, F.M.; DE RESENDE, M.D.V.; FARIA, V.R. *Multi-trait* BLUP in half-sib selection of annual crops. **Plant Breeding**, Malden, v. 129, p. 599-604, 2010.

4 CONCLUSÕES GERAIS

- A seleção simultânea de linhagens de milho tropical, tanto para eficiência no uso e tolerância ao estresse de N, assim como para produtividade e precocidade são possíveis.
- Para eficiência e tolerância, a Média Harmônica da Performance Relativa (MHPR) é o mais indicado. Já para produtividade e precocidade, o índice Aditivo é o de melhor desempenho.
- A eficácia da análise *multi-trait* é proporcional à correlação entre os caracteres, sendo esta recomendada apenas para caracteres com correlação desfavorável e de alta magnitude.