

CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SORGO EFICIENTES E RESPONSIVAS AO FÓSFORO¹

FABRICIO RODRIGUES^{2*}, JURANDIR VIEIRA DE MAGALHÃES³, CÉSAR AUGUSTO BRASIL PEREIRA PINTO⁴, FLÁVIO DESSAUNE TARDIN³, ROBERT EUGENE SCHAFFERT³

RESUMO - A otimização da eficiência nutricional é fundamental para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção. Ou seja, é importante a identificação de linhagens com maior eficiência e responsividade ao fósforo, almejando unir em híbridos, esses caracteres de uma só vez e, também, a melhor maneira de selecioná-las. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar quais caracteres devem ser considerados na seleção de genótipos de sorgo eficientes e responsivos ao fósforo. Realizou-se o desdobramento das correlações entre os caracteres avaliados, em efeitos diretos e indiretos, das variáveis básicas de eficiência e responsividade por meio da análise de trilha. O caráter que apresentou maior influência na eficiência de linhagens de sorgo ao fósforo foi índice de colheita de fósforo para eficiência de utilização e massa seca de grãos para eficiência de absorção e uso, sob condições de estresse. Sob condições de adubação adequada de fósforo, o caráter com influência marcante para a avaliação da responsividade ao fósforo foi o caráter massa seca de grãos para eficiência de recuperação aparente, eficiência fisiológica e eficiência agrônômica.

Palavras-chave: Análise de trilha. Eficiência nutricional. Correlação fenotípica. Seleção.

CRITERIA FOR SELECTION OF SORGHUM LINES EFFICIENT AND RESPONSIVE TO APPLICATION OF PHOSPHORUS

ABSTRACT - The optimization of nutritional efficiency is critical to increase productivity and reduce production costs. However, the identification of lines with greater efficiency and responsiveness to phosphorus is of great importance, with the intention to join the hybrid, these traits at once and, moreover, the best way to select them. Thus, the objective of this study was to evaluate which characters should be considered in the selection of genotypes efficient and responsive to phosphorus in sorghum. The correlations were split into direct and indirect basic variables of efficiency and responsiveness to phosphorus through path analysis. The character that most influenced the efficiency of sorghum lines to phosphorus was harvest index to utilization efficiency and dry matter to absorption efficiency and use, under conditions of stress. Under conditions of adequate phosphorus fertilization, the trait with the greatest influence for evaluation of responsiveness was dry grain mass to the apparent recovery efficiency, physiological and agronomic.

Keywords: Path analysis. Nutritional efficiency. Phenotypic correlation. Selection.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 26/03/2013; aceito em 05/06/2014.

Parte da Tese de doutorado do primeiro autor apresentada ao Departamento de Genética e Melhoramento de Plantas da Universidade Federal de Lavras;

²Departamento de Melhoramento Vegetal, UEG, Caixa Postal 13, 75780-000, Ipameri – GO, fabricio.rodrigues@ueg.br.

³Núcleo de Recursos Genéticos e Desenvolvimento de Cultivares (NRGC), Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas - MG, 35701-970, jurandir@cnpmc.embrapa.br; tardin@cnpmc.embrapa.br; schaffer@cnpmc.embrapa.br.

⁴Departamento de Biologia, UFLA, Caixa Postal 3037, Lavras – MG, 37200-000, cesarbrasil@dbi.ufla.br.

INTRODUÇÃO

O sorgo ocupa posição de destaque no país, por causa de sua alta capacidade fotossintética e, por ser mais tolerante que o milho sob altas temperaturas, se tornando uma alternativa viável para a alimentação animal em regiões com pouca disponibilidade hídrica (SOUZA et al., 2013), além disso, possui ampla adaptação a diferentes níveis de fertilidade do solo. Em contrapartida, o fornecimento adequado de nutrientes contribui de forma significativa tanto para o aumento da produtividade como para a redução dos custos de produção e, o excesso de nutrientes no solo, propicia sérios danos aos lençóis freáticos e vida aquática.

Segundo um estudo chinês realizado entre 1980 a 2005, grande parte do nitrogênio e do fósforo (P) aplicados na agricultura foram perdidos e que não contribuíram para aumentar a produção chinesa, como consequência, causaram contaminação dos rios das regiões norte, sul e leste do país (MA et al., 2012). Além disso, as reservas mundiais estão concentradas num pequeno número de países, o que sugere que o mundo pode enfrentar um pico na oferta de fósforo em poucos anos (CORDELL et al., 2009a), contribuindo com esses fatores, a contínua demanda por P para a produção de alimentos aumentou.

Na verdade, os mercados mundiais de commodities já experimentaram parte desse aumento nos últimos anos, no qual adubos provenientes de rochas fosfáticas sofreram grandes aumentos em curto período de tempo. Para muitos países, particularmente onde os preços ficaram mais abusivos, coloca sob questionamento a viabilidade e sustentabilidade da agricultura moderna e a necessidade de se considerar possíveis alternativas e opções para o futuro (CORDELL et al., 2009b). Uma das alternativas seria a utilização de cultivares eficientes e responsivos ao P, no qual acarretaria em menor custo de produção e em genótipos com maior capacidade de extrair o nutriente do solo, mesmo em casos de deficiência.

Segundo Clark e Duncan (1991), plantas capazes de produzir melhor (matéria seca de parte aérea ou grãos), num dado nível de nutriente no solo, são plantas com maior eficiência nutricional. Sabe-se que há variabilidade para eficiência e responsividade ao P em diversas culturas como, sorgo (CRUZ et al., 2009), arroz (CANCELLIER et al., 2012; TONELLO et al., 2012), feijão comum (OLIVEIRA et al., 2012), milho (FIDELIS et al., 2009; FIDELIS et al., 2010), leguminosas (FREIRE et al., 2012), inclusive para porta-enxerto de citros (ZAMBOROSI et al., 2012) e clones de eucalipto (PINTO et al., 2011), sendo que grande parte das seleções destes genótipos são feitas nas fases iniciais das culturas e com um número elevado de caracteres.

Atualmente, os programas de melhoramento visando à eficiência nutricional, buscam combinar

em um único genótipo várias eficiências, entretanto, o exercício da seleção pode ser torna inviável, devido ao elevado número de caracteres a serem avaliados e, assim, a identificação de caracteres que melhor discriminem os genótipos de sorgo, são de extrema importância para acelerar o programa.

Dessa forma, o objetivo com este trabalho foi estimar os coeficientes de correlação fenotípica e desdobrar em efeitos diretos e indiretos sobre os caracteres de eficiência e responsividade, com o intuito de identificar aqueles mais determinantes na avaliação da eficiência nutricional ao P, em sorgo granífero.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, entre os meses de fevereiro e julho de 2009, nos sítios de fenotipagem de fósforo da Embrapa Milho e Sorgo (Tabela 1), localizada no município de Sete Lagoas, MG, a uma altitude de 767 metros.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 30x2 (30 linhagens de sorgo em dois níveis de fósforo), com três repetições. Foram selecionadas cinco linhagens elites do programa para compor cada grupo de eficiência e responsividade (cinco eficientes e responsivas, cinco eficientes e não responsivas, cinco ineficientes e responsivas e cinco ineficientes e não responsivas) classificadas de acordo com a metodologia proposta por Fageria e Barbosa (1982) e mais dez linhagens experimentais pré-classificadas por Schaffert et al. (2001). As parcelas experimentais foram constituídas por duas linhas de 4 m, com espaçamento entre plantas de 0,15 m e entre linhas de 0,45 m.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens, para os dois níveis. A adubação de plantio foi realizada no sulco, de acordo com análise de solo de cada nível, na qual o nível controle (adubação padrão) foram aplicados 190 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo, 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 67 kg ha⁻¹ de uréia com o intuito de alcançar um nível de 35 mg dm⁻³ de P no solo. No ambiente sob estresse (baixo P – 6 mg dm⁻³) não foi aplicado qualquer tipo de adubo fosfatado e aplicados 110 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 67 kg ha⁻¹ de uréia, conforme os resultados da Tabela 1.

Foram avaliados os caracteres avaliados foram: massa fresca da parte aérea (MFPA) – obtida pela pesagem de três plantas inteiras representativas da parcela, medido em gramas, posteriormente transformado para kg ha⁻¹; massa seca da parte aérea (MSPA) – obtida pela pesagem de três plantas inteiras, colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 70°C, durante 72 horas e, então, pesadas, em gramas, posteriormente transformado para kg ha⁻¹; teor de fósforo nos grãos (TFG) – os grãos obtidos na parcela foram homogeneizados e retiradas amostras, utilizan-

do o método espectrofotométrico de análise de azul de molibdênio (Silva, 1999), em g kg⁻¹; teor de fósforo na parte aérea da planta (TFPA) – uma planta da parcela sem panícula e sem raiz, em cada uma das 3 repetições foram moídas, homogeneizadas e retiradas amostras, utilizando o método espectrofotométrico (Silva, 1999), em g kg⁻¹; índice de colheita de fósforo (ICF) – é a razão entre o teor de fósforo nos grãos e o teor de fósforo na parte aérea da planta, medido

em kg kg⁻¹; quociente de utilização (QUTIL) – razão entre a produtividade pelo teor de P nos grãos, medido em kg kg⁻¹; massa seca de grãos (MSG) – uma amostra dos grãos foi colocada em estufa de circulação forçada de ar a 70°C, durante 72 horas e, posteriormente, pesada, medida em g, logo após transformada para t ha⁻¹, sendo que todas as variáveis foram medidas aos 120 dias após a semeadura.

Tabela 1. Principais atributos químicos do solo (0-20 cm de profundidade), 30 dias após a aplicação dos fertilizantes, no sulco de semeadura. Sete Lagoas, MG, 2009.

Sítios	pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	P Mehlich ¹	M. O.	CTC	V	ST Al
	H ₂ O	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	g kg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³	%	%
Controle	5,8b	2,7ba	0,0mba	5,1mb	1,1b	106,3mb	30,5mb	3,8m	9,1mb	70,5b	0,0mba
Estresse	5,5b	4,5m	0,2mba	3,1b	0,6m	75,8b	6,2m	3,5m	8,4mb	46,3m	2,7mba

Metodologias descritas em SILVA (1999); mb - muito bom, b - bom, m - médio e mba - muito baixo; pH - acidez ativa, H+Al - acidez potencial, Al - acidez trocável, Ca - Cálcio trocável, Mg - Magnésio trocável, k - Potássio disponível, P - Fósforo disponível, M.O. - Matéria orgânica, CTC - Capacidade de troca catiônica efetiva, V - Saturação por bases, St Al - Saturação por Alumínio;

Com relação à eficiência sob condições de estresse nutricional e adubação adequada de P, os caracteres utilizados foram: eficiência de absorção (EFA) - definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo à razão entre kg de P na planta e kg de P disponível no solo, em kg kg⁻¹; eficiência de utilização (EFUTIL) - definida como a capacidade do genótipo de utilizar o P absorvido pela planta para produzir grãos, correspondendo à razão entre kg de massa seca de grãos produzidos e kg de P na planta, em kg kg⁻¹; eficiência de uso (EFUSO) - definida como o produto entre a eficiência de absorção e utilização de P, correspondendo a kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo, em kg kg⁻¹.

A responsividade foi avaliada pelos caracteres de produtividade (DFPROD) - definida pela diferença de produtividade de grãos entre os níveis controle e estresse, em t ha⁻¹; produtividade relativa (PREL) - definida como a diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse dividida pelo controle, em %; eficiência fisiológica (EFISIO) - definida pela diferença de produtividade de grãos entre os níveis controle e estresse por unidade adicional de nutriente na planta entre níveis, em kg kg⁻¹; eficiência de recuperação aparente (EFREC) - definida como a capacidade do genótipo em recuperar o nutriente aplicado ao solo entre os ambientes controle e estresse, ou seja, DFPROD dividido pela diferença de P no solo entre os ambientes; eficiência agrônômica (EFAGRO) - definida pela diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse por kg de P aplicado, em kg kg⁻¹.

Foram estudados os efeitos das variáveis explicativas sobre as básicas, nos sentidos unidirecionais, indicando o efeito direto de cada variável expli-

cativa sobre a básica, além dos sentidos bidirecionais, representado pela interdependência de duas ou mais variáveis explicativas sobre a básica, cuja magnitude é quantificada pela correlação fenotípica.

Realizou-se, então, o desdobramento dessas correlações em efeitos diretos e indiretos dos caracteres, sobre três variáveis de eficiência e três variáveis utilizadas para a medição da responsividade, por meio da análise de trilha com único diagrama causal, descrita por Cruz et al. (2004), utilizando o programa computacional Genes (CRUZ, 2006).

Os coeficientes de correlações fenotípicas foram estimados pela seguinte expressão, segundo CRUZ et al. (2004):

$$r_F = \frac{COV_{F(xy)}}{\sqrt{(\hat{\sigma}_x^2 \cdot \hat{\sigma}_y^2)}}$$

COV_{F(xy)}: corresponde a covariância fenotípica entre os caracteres x e y;

$\hat{\sigma}_x^2$: corresponde à variância fenotípica do caráter x;

$\hat{\sigma}_y^2$: corresponde à variância fenotípica do caráter y.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que a correlação fenotípica foi significativa, positiva e de alta magnitude entre TFPA com MSPA, MSG, EFA, EFUSO, entre MSPA com MFPA, MSG, EFA e EFUSO, entre QUTIL com MSG e EFUSO e, também, entre MSG com EFA e EFUSO, indicando que a seleção poderá

ser realizada por um número menor de caracteres, o que facilitaria o processo de seleção para eficiência ao fósforo em sorgo (Tabela 2). Estes resultados corroboram com os obtidos por Parentoni (2008) em

milho, avaliando diferentes caracteres de eficiência e responsividade, utilizando parentais contrastantes ao P.

Tabela 2. Coeficientes de correlação fenotípica entre dez caracteres sob condição de estresse de fósforo - teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL) e eficiência de uso (EFUSO). Sete Lagoas, MG, 2009.

VARIÁVEIS	TFG	MSPA	MFPA	ICF	QUTIL	MSG	EFA	EFUTIL	EFUSO
TFPA	0,00 ^{N.S}	0,86**	0,65**	-0,79**	0,67**	0,85**	0,98**	-0,38 ^{N.S}	0,85**
TFG	-	0,04 ^{N.S}	0,16 ^{N.S}	0,45*	-0,56**	-0,16 ^{N.S}	0,00 ^{N.S}	-0,17 ^{N.S}	-0,16 ^{N.S}
MSPA		-	0,84**	-0,69**	0,69**	0,88**	0,86**	-0,15 ^{N.S}	0,88**
MFPA			-	-0,50**	0,33 ^{N.S}	0,52**	0,65**	-0,40*	0,52**
ICF				-	-0,75**	-0,71**	-0,79**	0,38*	-0,71**
QUTIL					-	0,88**	0,67**	0,19 ^{N.S}	0,88**
MSG						-	0,85**	0,12 ^{N.S}	0,98**
EFA							-	-0,38**	0,85 ^{N.S}
EFUTIL								-	0,12 ^{N.S}

* e ** - significativo a 5% e a 1%, respectivamente, ao teste t; ^{N.S} - não significativo;

Verifica-se que EFUTIL, sob condições de estresse, possui uma correlação de baixa magnitude e não significativa, para a maioria dos caracteres avaliados, o que demonstra que haverá maior dificuldade na seleção de genótipos que apresentem alta EFUTIL e outras eficiências ao mesmo tempo (Tabela 2). O conhecimento da correlação entre caracteres pode ser primordial quando o objetivo é a seleção simultânea de caracteres ou quando um caráter de interesse revelar baixa herdabilidade, ou seja, de difícil identificação. Ao selecionar um caráter de alta herdabilidade, de fácil aferição e também identificação e que, ao mesmo tempo evidencie alta correlação com o caráter desejado, o melhorista poderá obter progressos mais rápidos por meio da seleção direta. Dessa forma, o pesquisador terá maior êxito se realizar a seleção de genótipos por meio do caráter ICF, com o intuito de promover pequenos ganhos no caráter EFUTIL.

O mesmo fato ocorreu com o caráter TFG, indicando que a seleção de genótipos com maior ou menor teor de fósforo nos grãos, não deverá afetar em outros caracteres de forma previsível, de acordo com os genótipos estudados (Tabela 2). Resultados semelhantes foram observados por Nakagama e Roselem (2005) estudando a aveia-preta, no qual foram aplicados 0, 40 e 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, confirmando que mesmo sob variações mais elevadas de fósforo ou mesmo sob estresse, o TFG tende a se manter estável e, dessa forma, não a variação ou correlação entre o TFG e demais caracteres.

É conveniente salientar que alguns caracteres são redundantes, quando avaliados em condições de baixa disponibilidade de P, por causa da magnitude da correlação apresentada e de sua significância. Isso pode ser observado pela correlação entre os caracte-

res TFPA com EFA e MSG com EFUSO, entre os caracteres de eficiência (Tabela 2). Em contrapartida, observado também entre TFPA com MSPA e EFA, além de MSPA com EFA e EFUSO, entre MSG com EFUSO entre os caracteres de responsividade, utilizando somente o nível controle para estimar as correlações e as responsabilidades (Tabela 3).

Registra-se que, independentemente do nível de P avaliado, o maior TFPA e MSG são caracteres que indicam a maior EFA e EFUSO, em linhagens de sorgo granífero, independente do nível de P no solo (Tabela 2 e 3). Detecta-se TFPA e MSPA, conforme Tabela 3, apresentam correlações positivas e de alta magnitude com um grande número de caracteres, o que viabiliza sua utilização nos programas de melhoramento, visando maior responsividade, sob alta disponibilidade de P. Segundo Fritsche-Neto et al. (2010), plantas de milho com maior massa seca apresentaram maior eficiência na utilização de P, tanto sob baixa quanto sob alta disponibilidade de P, confirmando os resultados obtidos neste trabalho.

Com relação aos caracteres que utilizam a combinação entre os níveis estresse e controle, percebe-se que entre DFPROD com PREL e EFAGRO e, entre PREL e EFAGRO, houve correlação alta e significativa, entretanto, o número de correlações significativas e de alta magnitude reduzem bastante quando comparados aos resultados obtidos utilizando-se apenas um nível para a estimação das eficiências e responsabilidades (Tabela 4). Estes resultados corroboram com Li et al. (2010) que mapearam QTLs para a produção de grãos e componentes da produtividade em milho, sob baixa e alta disponibilidade de P, no qual relatam que os QTLs detectados sob baixa disponibilidade de P não são os mesmos sob alta, indicando que seriam controles gênicos diferentes

atuando sob estresse e sob disponibilizações de P maiores.

A responsividade ao P, utilizando tanto o nível controle quanto na combinação entre os níveis de P, pode ser medida pela avaliação do caráter MSG,

pois, o caráter apresentou correlação de média à alta magnitude com todas variáveis analisadas, variando de 0,51 a 0,99, nas variáveis PREL e EFUSO, respectivamente, com exceção de EFUTIL (Tabela 3) e EFISIO (Tabela 4).

Tabela 3. Coeficientes de correlação fenotípica entre dez caracteres sob condição de adubação adequada de fósforo - teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL) e eficiência de uso (EFUSO). Sete Lagoas, MG, 2009.

VARIÁVEIS	TFG	MSPA	MFPA	ICF	QUTIL	MSG	EFA	EFUTIL	EFUSO
TFPA	0,36*	0,92**	0,69**	-0,79**	0,55**	0,87**	0,99**	-0,15 ^{N.S}	0,87**
TFG		0,27 ^{N.S}	0,27 ^{N.S}	0,16 ^{N.S}	-0,41*	0,19 ^{N.S}	0,36*	-0,49**	0,19 ^{N.S}
MSPA			0,80**	-0,75**	0,67**	0,94**	0,92**	0,08 ^{N.S}	0,94**
MFPA				-0,53**	0,36*	0,59**	0,69**	-0,19 ^{N.S}	0,59**
ICF					-0,79**	-0,77**	-0,79**	0,17**	-0,77**
QUTIL						0,78**	0,55**	0,58**	0,78**
MSG							0,87**	0,31 ^{N.S}	0,99**
EFA								-0,15 ^{N.S}	0,87**
EFUTIL									0,31 ^{N.S}

* e ** - significativo a 5% e a 1%, respectivamente, ao teste t; ^{N.S} - não significativo;

Acredita-se que a alta correlação observada entre os caracteres está aliada a alta incidência de alelos para responsividade ao P, no qual foram baseadas a maioria da seleções dos programas de melhoramento, o mesmo foi observado por DoValle (2012) avaliando eficiência nutricional em milho ao nitrogênio. Dessa forma, para uma pré-seleção de linhagens de sorgo, mais responsivas ao P, utilizando o caráter MSG, é o mais indicado e, por possuir como vantagem, a avaliação de apenas uma característica e que, normalmente, já é utilizada pelos programas de melhoramento. Que por sua vez, irá diminuir os gastos em estágios iniciais dos programas, visando seleção de linhagens mais responsivas em sorgo granífero. Deve-se levar em consideração que uma correlação

não implica em uma relação de causa e efeito entre as variáveis analisadas. O estudo das correlações entre caracteres não permite tirar conclusões sobre isto e, sim, sobre uma medida de associação (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Por isso, procedeu-se a análise de trilha (*path analysis*), a qual investiga a relação de causa-efeito e fornece a quantidade dessas relações, denominados de coeficientes de trilha. As estimativas dos efeitos totais, diretos, indiretos das sete variáveis explicativas sobre a EFA, EFUTIL e EFUSO para eficiência ao P e, também, EFREC, EFISIO e EFAGRO para responsividade a aplicação de P, estão apresentados nas Tabela 5, 6 e 7.

Tabela 4. Coeficientes de correlação fenotípica entre dez caracteres de sorgo, sob condição de adubação adequada de fósforo - teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL) e eficiência de uso (EFUSO) e mais cinco variáveis de responsividade obtidas pela combinação entre os níveis com e sem adubação - diferença de produtividade (DFPROD), produtividade relativa (PREL), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência agrônômica (EFAGRO). Sete Lagoas, MG, 2009.

VARIÁVEIS	DFPROD	PREL	EFREC	EFISIO	EFAGRO
TFPA	0,52**	0,45*	0,78**	-0,26 ^{N.S}	0,52**
TFG	0,10 ^{N.S}	0,10 ^{N.S}	0,26 ^{N.S}	-0,57**	0,10 ^{N.S}
MSPA	0,57**	0,46**	0,79**	-0,20 ^{N.S}	0,57**
MFPA	0,29 ^{N.S}	0,26 ^{N.S}	0,51**	-0,22 ^{N.S}	0,29 ^{N.S}
ICF	-0,54**	-0,55**	-0,56**	-0,15 ^{N.S}	-0,54**
QUTIL	0,53**	0,45**	0,50**	0,44*	0,53**
MSG	0,62**	0,51**	0,78**	-0,11 ^{N.S}	0,62**
EFA	0,52**	0,45*	0,78**	-0,26 ^{N.S}	0,52**
EFUTIL	0,24 ^{N.S}	0,12 ^{N.S}	0,03 ^{N.S}	0,45*	0,24 ^{N.S}
EFUSO	0,62**	0,51**	0,78**	-0,11 ^{N.S}	0,62**
DFPROD		0,92**	0,63**	0,14 ^{N.S}	0,99**
PREL			0,54**	0,17 ^{N.S}	0,92**
EFREC				-0,30 ^{N.S}	0,63**
EFISIO					0,14 ^{N.S}

* e ** - significativo a 5% e a 1%, respectivamente, ao teste t; ^{N.S} - não significativo.

Os coeficientes de determinação (r^2), no modelo da análise de trilha, evidenciam que as variáveis explicativas que foram utilizadas no estudo explicam quase toda a variação observada nas variáveis básicas de eficiência e pouco das variáveis básicas de responsividade (Tabela 5). Nota-se, também, os elevados valores das variâncias residuais nas variáveis básicas de responsividade, variando de 0,35 a 0,73, EFISIO e EFAGRO, respectivamente. Isto indica que para a avaliação da responsividade a adubação fosfatada são necessárias mais variáveis explicativas, com o intuito de melhor explicar a variação ocorrida nas variáveis básicas.

Algumas variáveis apesar de terem uma alta associação total com a variável básica, podem não ser a causa determinante das variações sobre o caráter de interesse. Neste caso, a concentração de esforços na seleção desta variável poderá não resultar em ganhos satisfatórios na variável básica (CRUZ et al., 2004). A situação descrita acima se manifesta nas relações de MSPA, MFPA, QUTIL e MSG em EFA, sendo que o mesmo fato ocorre para TFPA, MSPA, MFPA, MSG e QUTIL em EFUSO e, também, TFPA, MSPA, MSG em EFREC (Tabela 5, 6 e 7). Constata-se, pela análise de trilha, que essas associações são, fundamentalmente, determinadas pelo efeito indireto de outra variável. Percebe-se esse efeito na variável MSPA em EFA, por exemplo, onde o efeito direto sob EFA é extremamente baixo e bem próximo do valor do efeito residual (Tabela 5). Entretanto, o seu efeito total tem alta magnitude devido ao efeito indireto do TFPA (Tabela 6). Consequentemente basear-se na seleção de MSPA para a obtenção de ganhos genéticos em EFA, sem levar em consideração TFPA, não será uma boa estratégia para o programa de melhoramento.

Para fins de melhoramento, é importante identificar, dentre os caracteres de alta correlação com a variável básica, aqueles de maior efeito direto em sentido favorável a seleção, de tal forma que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja mais eficiente. Dessa forma, o TFPA para a variável básica EFA e MSG para EFUSO são os caracteres mais indicados para a avaliação da eficiência de P (Tabela 5), confirmados pelo valor do efeito direto e por não apresentar redução do seu efeito por meio de outras variáveis (Tabela 6 e 7).

O mesmo ocorreu com relação às variáveis básicas para responsividade, onde os caracteres mais indicados para EFREC são TFPA e MSPA, simultaneamente, visto que o efeito direto é alto e que o indireto está atrelado a outro caráter (Tabela 5 e 6). Verifica-se que para EFAGRO, a variável MSPA apresenta o maior valor de efeito direto e que o efeito indireto de outras variáveis é baixo (Tabela 6). Outro fato relevante é que variáveis com baixa associação com a variável básica, mas, com seu efeito direto de alta magnitude denotam que essa variável não deve ser totalmente descartada do uso de seleções indiretas. Como é possível observar na variável

ICF em EFUTIL (Tabela 5), apesar de apresentar baixa correlação significativa (Tabela 3), isto sugere que na seleção para EFUTIL, esse caráter deve ser levado em consideração, aliado a TFPA (Tabela 6) e, dessa forma, poderá proporcionar melhores resultados. Tal resultado era esperado, pois, o efeito direto de ICF (Tabela 5) está diretamente relacionado ao P translocado para o grão e, confirmados por Albuquerque et al. (2013), no qual avaliou a extração de macronutrientes em sorgo granífero. Entretanto, o ganho genético será maior se for utilizada a combinação entre de ICF e TFPA, por causa do efeito indireto desta variável (Tabela 6).

Os resultados da análise de trilha evidenciam que alguns caracteres apresentam baixo efeito total e direto, porém, são influenciados por outros caracteres na variável básica, como MSPA, MFPA, QUTIL em EFUTIL, além de TFPA, MSPA, MFPA, ICF em EFISIO e MFPA em EFAGRO (Tabela 5, 6 e 7), o que denota que essas variáveis explicativas podem ser descartadas e adicionadas outras, com o intuito de diminuir o efeito da variância residual.

As variáveis explicativas com maior efeito direto e indicadas para a seleção de genótipos com maior eficiência de P são TFPA para EFA, ICF para EFUTIL e MSG para EFUSO, sob condições de estresse de fósforo ou para solos com baixa disponibilidade deste nutriente (Tabela 5, 6 e 7), além de não apresentar alto efeito indireto, devido a outro caráter. Entretanto, a correlação existente entre MSG e TFPA é alta e significativa (0,85**), indicando que a seleção praticada em apenas uma trará ganhos na outra, inclusive para as eficiências citadas anteriormente (Tabela 2). Ou seja, a avaliação do caráter MSG já é suficiente para obter ganhos satisfatórios para EFA e EFUSO, simultaneamente.

Fato semelhante ocorreu com as variáveis explicativas de maior efeito direto e indicadas para a seleção de genótipos responsivos ao P, no qual os caracteres mais indicados foram MSPA para EFREC e EFAGRO e QUTIL para EFISIO, sob condições de adubação adequada de P (Tabelas 5, 6 e 7). Porém, por causa da correlação de alta magnitude e significativa das variáveis MSPA e QUTIL com MSG, sendo que este já é utilizado para a seleção de genótipos mais produtivos, sendo o caráter mais indicado para a seleção para de genótipos responsivos o P, em sorgo granífero.

Segundo Pereira et al. (2013), a seleção com base na matéria seca da parte aérea em milho, no estágio vegetativo V6, foi o caráter determinante na eficiência de uso de nitrogênio e fósforo, independente da disponibilidade destes nutrientes no solo, entretanto, existe a necessidade da colheita da planta inteira e secagem, o que se torna inviável na seleção de um grande número de genótipos.

De acordo com Chen et al. (2008), existe a possibilidade de se utilizar a seleção assistida por marcadores no futuro, com o intuito de acelerar o ganho com a seleção programas de melhoramento,

visando a eficiência nutricional ao P em milho e que pode ser encontrados QTLs para outras espécies. Porém, os QTLs variam de um local para o outro e

com relação à disponibilidade do nutriente, indicando mais uma vez que a seleção deve ser baseada, também, em caracteres fenotípicos.

Tabela 5. Estimativa do coeficiente de determinação, variância residual, efeitos totais e diretos das variáveis explicativas de teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG) sob as variáveis básicas, eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência de agrônômica (EFAGRO), em linhagens de sorgo granífero. Sete Lagoas, MG, 2009.

Variáveis Explicativas	Variáveis Básicas					
	Efeito Total					
	EFA ¹	EFUTIL ¹	EFUSO ¹	EFREC ²	EFISIO ²	EFAGRO ²
TFPA	1,000	-0,377	0,847	0,783	-0,258	0,520
TFG	-0,004	-0,167	-0,158	0,261	-0,566	0,099
MSPA	0,857	-0,146	0,881	0,789	-0,201	0,568
MFPA	0,653	-0,403	0,516	0,514	-0,221	0,291
ICF	-0,788	0,379	-0,711	-0,564	-0,151	-0,539
QUTIL	0,674	0,192	0,881	0,497	0,437	0,535
MSG	0,847	0,120	1,000	0,780	-0,108	0,620
	Efeito Direto					
TFPA	0,997	-1,121	0,001	0,570	-0,113	-0,555
TFG	-0,003	-0,294	-0,001	-0,303	0,971	0,460
MSPA	-0,003	-0,137	0,005	0,650	-0,392	1,113
MFPA	0,001	-0,069	-0,002	-0,239	0,012	-0,491
ICF	-0,003	0,611	0,001	0,317	-0,160	-0,485
QUTIL	-0,014	-0,277	-0,001	-0,324	2,493	0,410
MSG	0,015	1,859	0,998	0,367	-1,889	-0,435
Coefficiente de determinação =	1,000	0,921	1,000	0,703	0,873	0,457
Efeito da variância residual =	0,000	0,281	0,000	0,545	0,356	0,737

Tabela 6. Estimativas dos efeitos indiretos das variáveis explicativas TFPA, TFG, MSPA e MFPA sob as variáveis básicas de eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência de agrônômica (EFAGRO), em linhagens de sorgo granífero. Sete Lagoas, MG, 2009.

Variáveis Explicativas	Eficiência			Responsividade			
	EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO	
TFPA	Efeito indireto via TFG	0,000	0,001	0,000	-0,109	0,350	0,165
	via MSPA	-0,003	-0,118	0,004	0,596	-0,360	1,021
	via MFPA	0,001	-0,045	-0,001	-0,165	0,008	-0,339
	via ICF	0,002	-0,482	-0,001	-0,249	0,126	0,381
	via QUTIL	-0,010	-0,187	-0,001	-0,179	1,376	0,226
	via MSG	0,013	1,574	0,845	0,319	-1,645	-0,379
TFG	Efeito indireto via TFPA	-0,005	0,006	0,000	0,205	-0,041	-0,200
	via MSPA	0,000	-0,006	0,000	0,174	-0,105	0,298
	via MFPA	0,000	-0,011	0,000	-0,066	0,003	-0,135
	via ICF	-0,001	0,276	0,000	0,050	-0,025	-0,076
	via QUTIL	0,008	0,156	0,000	0,132	-1,015	-0,167
	via MSG	-0,002	-0,294	-0,158	0,069	-0,355	-0,082

Variáveis explicativas: Teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL) e massa seca de grãos (MSG).

Tabela 6. Continuação.

	Variáveis Explicativas	Eficiência			Responsividade		
		EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO
MSPA	Efeito indireto via TFPA	0,854	-0,961	0,000	0,522	-0,103	-0,509
	via TFG	0,000	-0,012	0,000	-0,081	0,260	0,123
	via MFPA	0,001	-0,057	-0,002	-0,190	0,010	-0,391
	via ICF	0,002	-0,424	0,000	-0,238	0,120	0,364
	via QUTIL	-0,010	-0,192	-0,001	-0,219	1,680	0,276
	via MSG	0,014	1,638	0,879	0,345	-1,776	-0,409
MFPA	Efeito indireto via TFPA	0,651	-0,732	0,000	0,393	-0,078	-0,383
	via TFG	-0,001	-0,048	0,000	-0,083	0,266	0,126
	via MSPA	-0,003	-0,115	0,004	0,517	-0,312	0,885
	via ICF	0,001	-0,307	0,000	-0,170	0,086	0,259
	via QUTIL	-0,005	-0,091	0,000	-0,118	0,910	0,150
	via MSG	0,008	0,959	0,515	0,214	-1,105	-0,255

Variáveis explicativas: Teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL) e massa seca de grãos (MSG).

Tabela 7. Estimativas dos efeitos indiretos das variáveis explicativas ICF, QUTIL e MSG sobre as variáveis básicas de eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência de agrônômica (EFAGRO), em linhagens de sorgo granífero. Sete Lagoas, MG, 2009.

	Variáveis Explicativas	Eficiência			Responsividade		
		EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO
ICF	Efeito indireto via TFPA	-0,786	0,884	0,000	-0,447	0,088	0,436
	via TFG	-0,002	-0,133	0,000	-0,048	0,152	0,072
	via MSPA	0,002	0,095	-0,003	-0,488	0,295	-0,836
	via MFPA	0,000	0,034	0,001	0,128	-0,006	0,263
	via QUTIL	0,011	0,208	0,001	0,258	-1,982	-0,326
	via MSG	-0,011	-1,322	-0,709	-0,284	1,462	0,337
QUTIL	Efeito indireto via TFPA	0,673	-0,757	0,000	0,314	-0,062	-0,306
	via TFG	0,002	0,166	0,001	0,123	-0,395	-0,187
	via MSPA	-0,002	-0,095	0,003	0,438	-0,264	0,750
	via MFPA	0,000	-0,022	-0,001	-0,087	0,004	-0,179
	via ICF	0,002	-0,460	0,000	-0,252	0,127	0,385
	via MSG	0,014	1,638	0,879	0,284	-1,466	-0,338
MSG	Efeito indireto via TFPA	0,844	-0,950	0,000	0,496	-0,098	-0,483
	via TFG	0,001	0,046	0,000	-0,057	0,183	0,086
	via MSPA	-0,003	-0,121	0,004	0,611	-0,369	1,047
	via MFPA	0,000	-0,035	-0,001	-0,140	0,007	-0,287
	via ICF	0,002	-0,435	0,000	-0,245	0,124	0,375
	via QUTIL	-0,013	-0,244	-0,001	-0,252	1,934	0,318

Variáveis explicativas: Teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL) e massa seca de grãos (MSG).

CONCLUSÃO

Os caracteres que apresentaram influência determinante sobre a eficiência de linhagens de sorgo granífero ao fósforo foram índice de colheita de fósforo para eficiência de utilização e, massa seca de grãos para eficiência de absorção e uso, sob condições de estresse.

Sob condições de adubação adequada de fósforo, o caráter com influência marcante na avaliação da responsividade ao fósforo foi o caráter massa seca de grãos para eficiência de recuperação aparente, eficiência fisiológica e eficiência agrônômica.

É possível reduzir o número de caracteres avaliados para a seleção linhagens eficientes e responsivas ao fósforo e, dessa forma, acelerar e reduzir os custos das avaliações, em programas de melhora-

mento visando eficiência nutricional para o sorgo granífero.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. J. B.; CAMARGO, R. D.; SOUZA, M. F. Extração de macronutrientes no sorgo granífero em diferentes arranjos de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete lagoas, v. 12, n. 1, p. 10-20, 2013.

CANCELLIER, E. L. et al. Phosphorus use efficiency of upland rice cultivars on Cerrado soil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 8, n. 2, p. 307-318, 2012.

CHEN, J. et al. QTL mapping of phosphorus efficiency and relative biologic characteristics in maize (*Zea mays* L.) at two sites. **Plant and Soil**, Crawley, v. 313, n.1-2, p.251-266, 2008.

CLARK, R. B.; DUNCAN, R. R. Improvement of plant mineral nutrition through breeding. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 219-240, 1991.

CORDELL, D. et al. Preferred future phosphorus scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand. In: **International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams**. IWA Publishing, 2009a. p. 23.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, London, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009b.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3.ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 480 p.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: Versão Windows**, aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa (MG): Universidade Federal de Viçosa. 2006.

CRUZ, S. J. S. et al. Adubação fosfatada para a cultura do sorgo granífero. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 91-97, 2009.

DOVALE, J. C. et al. Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 385-392, 2012.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Avaliação preliminar de cultivares de arroz irrigado para maior eficiência de utilização de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 12, p. 1709-1712, 1982.

FIDELIS, R. R. et al. Classificação de populações de milho quanto à eficiência e resposta ao uso de fósforo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 241-246, 2010.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V.; ERASMO, E. A. L. Seleção de populações base de milho sob alta e baixa dose de fósforo em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 285-293, 2009.

FREIRE, A. L. DE O.; LEÃO, D. A. S.; MIRANDA, J. R. P. Acúmulo de massa seca e de nutrientes em gliricídia em resposta ao estresse hídrico e a doses de fósforo. **Semina**, Londrina, v. 33, n. 1, p. 19-26, 2012.

FRITSCHÉ-NETO, R. et al. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 465-471, 2010.

LI, M. et al. Mapping QTLs for grain yield and yield components under high and low phosphorus treatments in maize (*Zea Mays*). **Plant science**, Crawley, v. 178, n. 5, p. 454-462, 2010.

MA, L. et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005. **Science of The Total Environment**, Barcelona, v. 434, n. 15, p. 51-61, 2012.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. A. Teores de nutrientes na folha e nos grãos de aveia-preta em função da adubação com fósforo e potássio. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p. 441-445, 2005.

OLIVEIRA, T. C. et al. Eficiência e resposta à aplicação de fósforo em feijão comum em solos de cerrado. **Revista Verde**, Fortaleza, v. 7, n. 1, p. 16-24, 2012.

PARENTONI, S. N. **Estimativa de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical**. 2008. 207 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2008.

PEREIRA, F. B. et al. Relação entre os caracteres determinantes das eficiências no uso de nitrogênio e fósforo em milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 5, p. 636-645, 2013.

PINTO, S. I. DO C. et al. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 523-533, 2011.

SCHAFFERT, R. E. et al. Genetic variability in sor-

ghum for P efficiency and responsiveness. **Plant Nutrition**, Athens, v. 92, n. 1, p. 72-73, 2001.

SILVA, F. C. da. **Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

SOUZA, L. C. D. et al. Osmorreguladores em plantas de sorgo sob suspensão hídrica e diferentes níveis de silício. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 240-249, 2013.

TONELLO, L. P. et al. Eficiência do uso de fósforo em genótipos de arroz cultivados em solos de terras altas. **Revista Verde**, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 25-32, 2012.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

ZAMBROSI, F. C. B. et al. Eficiência de absorção e utilização de fósforo em porta-enxertos cítricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 485-496, 2012.