

Seleção de linhagens de sorgo granífero eficientes e responsivas à aplicação de fósforo

Fabricio Rodrigues⁽¹⁾, Jurandir Vieira de Magalhães⁽²⁾, Claudia Teixeira Guimarães⁽²⁾, Flávio Dessaune Tardin⁽²⁾ e Robert Eugene Schaffert⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual de Goiás, Rodovia GO-330, Km 241, Anel Viário, CEP 75780-000 Ipameri, GO, Brasil. E-mail: fabricio.rodrigues@ueg.br

⁽²⁾Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG-424, Km 45, CEP 35701-979 Sete Lagoas, MG, Brasil. E-mail: jurandir.magalhaes@embrapa.br, claudia.guimaraes@embrapa.br, flavio.tardin@embrapa.br, robert.schaffert@embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi selecionar linhagens de sorgo simultaneamente responsivas ao fósforo e com elevada eficiência produtiva quanto a esse nutriente. Foram avaliadas 36 linhagens endogâmicas, em delineamento de blocos ao acaso, com duas repetições. Os caracteres usados para avaliação da eficiência produtiva foram produtividade média e eficiências de absorção, de utilização e de uso de fósforo, com e sem adubação fosfatada. Para análise da responsividade ao nutriente, foram avaliados caracteres de produtividade relativa e de eficiências de recuperação aparente, fisiológica e agrônômica. Há variabilidade genética entre as linhagens quanto às eficiências de absorção, de utilização e de uso do fósforo, e quanto à responsividade ao nutriente, o que sugere a possibilidade de produção de híbridos destinados a nichos de mercado diferentes. As linhagens mais responsivas foram P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E e SC566, e as mais eficientes, sob baixa disponibilidade de fósforo, foram ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 e BR012 (R6). As linhagens ATF40B, ATF54 (f61), ATF54 (f596), QL3 e SC566 apresentaram melhor desempenho simultâneo das diferentes eficiências avaliadas e da responsividade ao fósforo. Apenas a avaliação do caráter produtividade, sob diferentes disponibilidades de fósforo, já permite identificar linhagens eficientes e responsivas ao fósforo.

Termos para indexação: *Sorghum bicolor*, eficiência de absorção, estresse nutricional, índice de seleção, seleção simultânea.

Selection of grain sorghum lines efficient and responsive to phosphorus application

Abstract – The objective of this work was to select sorghum lines simultaneously responsive to phosphorus fertilization and with high productive efficiency regarding this nutrient. Thirty six sorghum inbred lines were evaluated in a randomized complete block design, with two replicates. The traits used to evaluate the productive efficiency were average yield and efficiencies of absorption, utilization, and use of phosphorus, with and without phosphorus fertilization. For the analysis of the responsivity to the nutrient, the evaluated traits were relative yield and apparent recovery, physiological, and agronomic efficiencies. The lines were genetically divergent as to the efficiencies of absorption, utilization, and use of phosphorus, and to the responsivity to the nutrient, suggesting the possibility of producing hybrids destined to different market niches. The most responsive lines were P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E, and SC566, and the most efficient ones under low phosphorus availability were ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225, and BR012 (R6). The ATF40B, ATF54 (f61), ATF54 (f596), QL3, and SC566 lines showed better simultaneous performance for the different evaluated efficiencies and for the responsivity to phosphorus. The evaluation of productivity alone, under different phosphorus availabilities, already makes it possible to identify efficient and responsive lines to phosphorus.

Index terms: *Sorghum bicolor*, absorption efficiency, nutritional stress, selection index, simultaneous selection.

Introdução

A agricultura moderna é altamente dependente do fósforo derivado de rocha fosfática, que é um recurso não renovável cujas reservas globais poderão se esgotar dentro de 40 a 150 anos (McGill, 2012). Entretanto, é possível que ocorram problemas de

abastecimento do fertilizante antes do previsto, por causa da concentração de reservas em um pequeno número de países. Dessa forma, a disponibilidade de P para as plantas representa fator chave para a segurança alimentar global e para a agricultura sustentável (Godfray et al., 2010; Malingreau et al., 2012).

Uma estratégia adequada para enfrentar esse problema seria detectar e explorar a variabilidade genética, para aumentar a eficiência produtiva das plantas relacionada à nutrição fosfatada e à responsividade ao fósforo, o que possibilitaria redução nos gastos com fertilizantes, pela maior adaptação das plantas a solos com baixa disponibilidade do nutriente (Good et al., 2004).

A existência de variabilidade genética em relação à eficiência produtiva e à responsividade ao fósforo tem sido identificada em diferentes culturas, como sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] por Rocha et al. (2010), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) por Oliveira et al. (2012) e milho (*Zea mays* L.) por DoVale et al. (2013). Essa diversidade constitui a base genética para programas de melhoramento e é decorrente de uma série de mecanismos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos desenvolvidos por plantas submetidas a condições adversas de fertilidade do solo, especialmente sob baixa disponibilidade de fósforo.

O objetivo deste trabalho foi selecionar linhagens de sorgo simultaneamente responsivas ao fósforo e com elevada eficiência produtiva quanto a esse nutriente.

Material e Métodos

O experimento foi realizado entre fevereiro e julho de 2009, em Latossolo Vermelho-Escuro, nos sítios de fenotipagem de fósforo da Embrapa Milho e Sorgo, no Município de Sete Lagoas, MG, a 767 m de altitude. O solo apresentava 360 g kg⁻¹ de areia, 100 g kg⁻¹ de silte e 540 g kg⁻¹ de argila.

Foram utilizadas 36 linhagens endogâmicas (F_{7,8}) e elites do programa de melhoramento de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo, com comportamento contrastante quanto à eficiência produtiva e à responsividade ao fósforo. Parte das linhagens foi pré-classificada por Schaffert et al. (2001). Essas linhagens têm sido usadas na formação de novos híbridos e constituem um conjunto de linhagens experimentais provenientes de diferentes famílias ATF, BR, CMSXS e Tx, com diferentes capacidades de aquisição do P disponível no solo e níveis de tolerância ao alumínio tóxico.

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com duas repetições. 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, com duas linhas de bordaduras laterais, em todo o experimento, em cada sítio de fenotipagem. O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens. A adubação de semeadura foi realizada no sulco, de acordo com os resultados das análises de solo. As linhagens foram avaliadas sob dois níveis de fósforo: com ou sem adubação fosfatada padrão. Na adubação padrão foram aplicados 190 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo (42% de P₂O₅), 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (60% de K₂O) e 67 kg ha⁻¹ de ureia (45% de N), para alcançar 35 mg dm⁻³ de P. No nível com baixa disponibilidade de P, não foi aplicado qualquer tipo de adubo fosfatado. Porém, aplicaram-se 110 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 64 kg ha⁻¹ de ureia.

Foram retiradas 100 amostras de solo, em cada nível de disponibilidade de P – controle e estresse –, para análises químicas (Tabela 1). Em média, os solos sob os níveis padrão e de baixa disponibilidade de P apresentaram 30,5 e 6,2 mg dm⁻³ de P, respectivamente.

A eficiência produtiva das linhagens em condições de estresse nutricional e de adubação adequada foi avaliada por meio de: produtividade média, obtida pela pesagem dos grãos de cada parcela e transformada para Mg ha⁻¹; eficiência de absorção (E_{ABS}), definida como a capacidade de o genótipo absorver o P disponível no solo, expressa pela razão entre a quantidade de P na planta e de P disponível no solo (kg kg⁻¹); eficiência de utilização (E_{UTIL}), que é a capacidade de o genótipo utilizar o P absorvido para produção de grãos, expressa pela razão entre a quantidade de matéria seca de grãos produzidos e de P na planta (kg kg⁻¹); e eficiência de uso (E_{USO}), definida como o produto entre as eficiências de absorção e de utilização de P, expressa pela quantidade de matéria seca de grãos produzidos por cada quilo de P disponível no solo (kg kg⁻¹).

Para a avaliação do teor de P na planta e nos grãos, foram utilizadas três plantas inteiras representativas de cada parcela, das quais foram obtidas as massas de matéria fresca; posteriormente, foram obtidas as massas de matéria fresca de panículas e grãos. Após trituradas, as plantas foram secas, pesadas e moídas, tendo-se retirado amostras para análises químicas, pelo método de espectrofotometria com azul de molibdênio.

A responsividade das linhagens à aplicação de fósforo foi avaliada a partir dos caracteres: produtividade relativa (P_{REL}), definida como a diferença de produtividade entre os níveis controle e baixa

disponibilidade de P, dividida pela produtividade do controle e multiplicada por 100; eficiência fisiológica (E_{FISIO}), obtida pela diferença de produtividade entre os dois níveis de disponibilidade de P, por unidade (kg) adicional de nutriente acumulado pelas plantas entre os níveis de alta e baixa disponibilidade (kg kg^{-1}); eficiência de recuperação aparente (E_{REC}), definida como a capacidade de o genótipo recuperar o nutriente aplicado ao solo, expressa pela diferença de produtividade entre os níveis, dividida pela diferença de P no solo entre os níveis (kg kg^{-1}); e eficiência agrônômica (E_{AGRO}), expressa pela diferença de produtividade entre os níveis de disponibilidade de P, dividida pela quantidade de P aplicada no nível controle (kg kg^{-1}).

A classificação das linhagens quanto à eficiência e à responsividade ao P foi efetuada da seguinte forma: linhagens eficientes obtiveram produtividades acima da média, em ambientes com baixa disponibilidade de P; enquanto linhagens responsivas tiveram produtividade acima da média geral das linhagens em condições de adubação adequada. Posteriormente, as linhagens foram classificadas de acordo com a soma de postos, ou de “ranques” (Mulamba & Mock, 1978), tendo-se avaliado os caracteres de resposta e de eficiência produtiva em relação ao P, em condições de estresse. Assim, foi possível avaliar a possibilidade de utilização do caráter produtividade de grãos, em fases iniciais do programa de melhoramento, como indicador da ocorrência de ganho simultâneo quanto às diferentes eficiências nutricionais das linhagens de sorgo.

Inicialmente, os experimentos foram analisados separadamente, conforme o modelo estatístico: $Y_{ij} = m + g_i + b_j + \varepsilon_{(ij)}$, em que Y_{ij} refere-se à linhagem i no bloco j ; m é a média geral; g_i é o efeito da i -ésima

linhagem; b_j é o efeito do j -ésimo bloco; e $\varepsilon_{(ij)}$ é o erro experimental. Em seguida, foi realizada a análise de variância conjunta, em que as fontes de variação do modelo foram consideradas fixas e os erros, aleatórios, com uso do modelo estatístico: $Y_{ijq} = m + g_i + a_q + b_{j(q)} + (ga)_{iq} + \varepsilon_{ij(q)}$, em que Y_{ijq} refere-se à observação da linhagem i no bloco j dentro do nível q ; m é a média geral; g_i é o efeito da i -ésima linhagem; a_q é o efeito do nível q de fósforo; $b_{j(q)}$ é o efeito do j -ésimo bloco dentro do nível q ; $(ga)_{iq}$ é o efeito da interação linhagens i e níveis q de fósforo; e $\varepsilon_{ij(q)}$ é o erro experimental. Procedeu-se, então, ao agrupamento das médias, pelo método de Scott & Knott, a 5% de probabilidade, tendo-se utilizado o programa computacional Genes (Cruz, 2006).

Resultados e Discussão

As linhagens apresentaram comportamentos divergentes para a maioria dos caracteres avaliados (Tabela 2), o que revela a existência de variabilidade genética entre elas e, também, alto valor do coeficiente de variação genética (CV_g). O coeficiente de variação experimental variou de 10 a 35% e indicou boa precisão experimental (Parentoni, 2008).

Em condições de adubação adequada de P, as linhagens mais produtivas foram BR008B, SC566, BR007B, P9401 e ATF40B, que apresentaram produtividades aproximadamente 2 Mg maiores que a média geral. Desse modo, essas linhagens têm potencial para serem utilizadas na formação de novos híbridos comerciais, destinados a sistemas de produção com nível tecnológico mais elevado, ou, ainda, na formação de populações para extração

Tabela 1. Atributos químicos do solo na camada de 0–20 cm de profundidade, obtidos em 100 amostras de solo, antes e após aplicação dos fertilizantes nos níveis tradicional (controle) e sem adubação (estresse) com $P^{(1)}$.

Níveis	pH em H_2O	CTC	H+Al	Al^{3+} ($\text{mol}_e \text{ dm}^{-3}$)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+ (mg dm^{-3})	P (Mehlich 1) (g kg^{-1})	MO (g kg^{-1})	V (%)	m
Antes da aplicação dos fertilizantes											
Controle	5,6b	7,3mb	3,8m	0,2mba	5,3mb	1,2b	85b	13,3m	3,4m	64,2b	1,8mba
Estresse	5,3b	8,2mb	4,8m	0,3mba	2,7b	0,5m	68b	4,6ba	3,4m	42,6m	10,3ba
Após a aplicação dos fertilizantes											
Controle	5,8b	9,1mb	2,7ba	0,0mba	5,1mb	1,1b	106,3mb	30,5mb	3,8m	70,5b	0,0mba
Estresse	5,5b	8,4mb	4,5m	0,2mba	3,1b	0,6m	75,8b	6,2m	3,5m	46,3m	2,7mba

⁽¹⁾Atributos classificados segundo critérios do Sistema brasileiro de classificação de solos (1999): mb, muito bom; b, bom; m médio; ba, baixo; e mba, muito baixo. MO, matéria orgânica do solo; V, saturação por bases; e m, saturação por Al^{3+} .

de novas linhagens destinadas a esse mercado (Tabela 3).

A linhagem ATF40B foi a que apresentou maior E_{ABS} , tendo sido capaz de absorver 62% do total de P disponível no solo, no nível controle (Tabela 3). A fixação de fosfatos na superfície de minerais de argila, ou a precipitação com outros elementos presentes na solução do solo, tem impellido os produtores a aumentar as adubações com P_2O_5 , especialmente em Latossolos, mesmo sem o auxílio de análise prévia para avaliação do P disponível no solo (Ranno et al., 2007; Santos et al., 2008). O uso de linhagens com maior E_{ABS} poderia, assim, reduzir os custos de produção e minimizar o impacto ambiental das adubações fosfatadas (Luo et al., 2012).

Seis linhagens tiveram E_{UTIL} acima da média geral, em condições de adubação adequada (Tabela 3). Essas linhagens foram agrupadas em dois grupos distintos (a e b), pelo teste de Scott & Knott, e apresentaram E_{UTIL} entre 432 e 118 kg kg⁻¹. A linhagem ATF54 (f240) apresentou E_{UTIL} aproximadamente quatro vezes maior que a média geral das linhagens e merece estudos mais detalhados para avaliação do seu mecanismo de utilização de P. Fritsche-Neto et al. (2010) relataram que a capacidade de acúmulo de P pelas plantas de milho pode ser utilizada na seleção indireta de linhagens com elevada eficiência de utilização do nutriente.

O caráter E_{USO} não discriminou bem os genótipos, e apenas dez linhagens apresentaram desempenho acima da média geral (grupo a), no nível controle (Tabela 3).

Essa variável depende de E_{ABS} e E_{UTIL} . Portanto, o alto valor de E_{USO} da linhagem BR008B (46,7 kg kg⁻¹) deveu-se a sua elevada capacidade de absorção de P, enquanto o da linhagem SC566 (46,2 kg kg⁻¹) esteve associado a sua maior capacidade de utilização de P.

As linhagens eficientes apresentaram produtividade média 1,42 Mg maior que a das linhagens menos eficientes (Tabela 3). Ao se considerar a proposta de classificação utilizada no presente trabalho, apenas oito linhagens poderiam ser consideradas eficientes (grupos a e b).

Em condições de baixa disponibilidade de P, as linhagens não diferiram significativamente quanto aos caracteres E_{ABS} e E_{USO} , indício de que apresentam as mesmas estratégias de aquisição do nutriente (Tabela 3). Entre essas estratégias, as mais comuns são o desenvolvimento de maior quantidade de raízes basais e axiais com grande número de pelos radiculares, a formação de exsudatos radiculares e o crescimento das raízes em ângulos diferentes (Ramaekers et al., 2010; Lynch, 2011).

A linhagem ATF54 (f240) também apresentou elevada E_{UTIL} , em condição de baixa disponibilidade de P, e, portanto, teve alta capacidade de produção de grãos, com baixo acúmulo de fósforo na parte aérea (Tabela 3). Diferenças entre os mecanismos de absorção e utilização de P, dentro da mesma espécie, fazem com que sejam encontradas linhagens com mecanismos fisiológicos, biológicos ou químicos mais adaptados a condições de estresse, o que já foi relatado em trigo (*Triticum*

Tabela 2. Estimativa dos quadrados médios das linhagens (QM_L) e da interação entre linhagens e níveis de adubação ($QM_{L \times N}$), bem como coeficiente de variação experimental (CV) e coeficiente de variação genética (CV_g), para os parâmetros de eficiência produtiva e responsividade obtidos em condições de adubação normal (controle) e de ausência de adubação fosfatada (estresse).

Estimativa	Produtividade	Eficiência produtiva ⁽¹⁾			Responsividade ⁽²⁾			
		E_{ABS}	E_{UTIL}	E_{USO}	P_{REL}	E_{REC}	E_{FISIO}	E_{AGRO}
Adubação controle								
QM_L	3,92**	0,02*	3.624,28**	166,26*	0,05*	0,01*	0,22*	153,82**
CV_g	30,17	29,97	66,89	21,38	52,50	27,36	9,12	71,99
CV (%)	9,96	13,46	11,66	22,40	19,57	21,30	19,52	24,04
Sem adubação								
QM_L	1,66**	0,36 ^{ns}	9.481,44**	2.945,96 ^{ns}	-	-	-	-
CV_g	25,20	48,27	48,20	21,81	-	-	-	-
CV (%)	18,39	35,50	18,51	31,19	-	-	-	-
Análise conjunta da eficiência produtiva e da responsividade								
QM_L	3,81 ^{ns}	0,68 ^{ns}	254,43*	184,52*	-	-	-	-
$QM_{L \times N}$	1,88**	0,21 ^{ns}	3.855,96**	175,58*	-	-	-	-
CV_g	22,27	25,78	62,03	7,44	-	-	-	-
CV (%)	11,75	10,05	10,50	35,51	-	-	-	-

⁽¹⁾ E_{ABS} , eficiência de absorção; E_{UTIL} , eficiência de utilização; e E_{USO} , eficiência de uso. ⁽²⁾ P_{REL} , produtividade relativa; E_{REC} , eficiência de recuperação; E_{FISIO} , eficiência fisiológica; e E_{AGRO} , eficiência agrônômica. ^{ns}Não significativo. ** e *Significativo pelo teste F, a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 3. Produtividade e classificação⁽¹⁾ das linhagens de acordo com a produtividade média, e eficiências de absorção (E_{ABS}), de utilização (E_{UTIL}) e de uso (E_{USO}) em condições de adubação normal (controle) e ausência de adubação fosfatada (estresse), em sorgo (*Sorghum bicolor*) granífero⁽²⁾.

Linhagem	Controle					Estresse					
	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Classe	E_{ABS}	E_{UTIL}	E_{USO}	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Classe	E_{ABS}	E_{UTIL}	E_{USO}	
			------(kg kg ⁻¹)-----					------(kg kg ⁻¹)-----			
ARG1	3,51c	R	0,29d	103,99c	30,15b	1,28d	I	0,53a	187,83d	98,83a	
ATF13B	2,46e	NR	0,24d	87,50c	21,25b	0,96d	I	0,17a	430,08b	74,75a	
ATF14B	2,30e	NR	0,28d	70,34d	19,81b	1,49d	I	0,41a	281,24c	115,22a	
ATF40B	5,31a	R	0,62a	73,47d	45,42a	3,77a	E	1,54a	186,08d	287,35a	
ATF53B	2,88d	NR	0,25d	96,93c	24,65b	0,91d	I	0,26a	271,59c	71,06a	
ATF54 (f186)	4,10c	R	0,34c	100,48c	34,52a	1,94c	I	1,90a	77,07d	146,30a	
ATF54 (f206)	3,90c	R	0,29d	111,53c	31,95b	1,95c	I	1,04a	144,10d	149,90a	
ATF54 (f240)	4,50b	R	0,08e	432,31a	36,69a	1,22d	I	0,17a	555,65a	94,05a	
ATF54 (f596)	3,97c	R	0,44b	75,08d	33,12a	2,27c	I	2,63a	66,50d	175,02a	
ATF54 (f61)	3,47c	R	0,24d	122,27b	29,52b	2,14c	I	0,53a	309,94c	164,90a	
ATF54 (f64)	3,66c	R	0,39c	79,32d	30,58b	1,66c	I	1,27a	100,43d	127,68a	
ATF54B	2,92d	NR	0,17e	149,28b	24,90b	2,10c	I	1,08a	150,99d	163,17a	
BR005R	2,89d	NR	0,22d	110,75c	24,85b	3,97a	E	0,80a	383,32b	305,43a	
BR007B	5,43a	R	0,41c	111,31c	45,86a	1,90c	I	0,91a	161,87d	147,01a	
BR008B	5,50a	R	0,52b	89,76c	46,78a	1,92c	I	1,20a	123,93d	148,64a	
BR012R	2,35e	NR	0,30d	67,91d	20,25b	1,86c	I	0,88a	149,65d	131,74a	
BR012 (1B)	1,78f	NR	0,46b	33,36d	15,43b	2,77b	E	1,28a	168,28d	215,90a	
BR012 (2B)	2,57e	NR	0,34c	65,31d	21,94b	2,27c	I	0,91a	191,51d	174,58a	
BR012 (R6)	2,43e	NR	0,35c	59,01d	20,69b	2,90b	E	0,80a	275,21c	221,37a	
BTX623	2,44e	NR	0,29d	71,25d	20,99b	1,62d	I	0,88a	143,45d	125,73a	
CMSXS110	3,13d	NR	0,37c	72,86d	26,81b	2,08c	I	0,99a	162,38d	160,65a	
CMSXS136	3,30d	NR	0,26d	106,64c	28,15b	2,33c	I	1,42a	114,11d	161,88a	
CMSXS180R	3,87c	R	0,34c	93,01c	31,17b	2,76b	E	1,22a	169,62d	206,71a	
CMSXS225	3,06d	NR	0,40c	63,53d	25,32b	2,95b	E	0,99a	221,77c	219,50a	
CMSXS226	3,13d	NR	0,28d	95,92c	26,68b	2,15c	I	1,12a	141,64d	158,77a	
CMSXS227	1,83f	NR	0,23d	69,06d	15,56b	1,41d	I	0,74a	142,70d	106,03a	
IS3620C	2,09e	NR	0,21d	83,53c	17,84b	1,39d	I	0,62a	172,89d	107,60a	
P9401	5,39a	R	0,47b	97,78c	45,63a	1,16d	I	0,43a	209,77c	89,91a	
P9405	3,42d	R	0,51b	56,42d	28,87b	2,69b	E	1,03a	199,79d	205,55a	
QL3	4,49b	R	0,42c	88,90c	37,56a	2,13c	I	1,05a	154,50d	161,86a	
SC414-12E	4,71b	R	0,34c	117,81b	39,76a	1,88c	I	0,79a	184,45d	145,30a	
SC566	5,45a	R	0,36c	129,05b	46,22a	3,27b	E	1,27a	199,18d	253,33a	
Tx643 B	1,52f	NR	0,15e	84,55c	12,87b	1,40d	I	0,67a	151,50d	102,05a	
Tx644 B	3,29d	NR	0,22d	122,99b	27,67b	1,90c	I	0,67a	219,52c	146,46a	
Tx645 B	1,75f	NR	0,25d	59,66d	15,00b	0,81d	I	0,40a	156,31d	63,11a	
TX7078R	3,66c	R	0,47b	66,29d	31,21b	1,92c	I	0,59a	252,09c	147,53a	
						Média					
Geral	3,40	-	0,33	97,75	28,77	Geral	2,03	-	0,92	200,30	154,86
Responsivo	4,37	-	0,38	114,63	36,76	Ineficiente	1,72	-	0,87	193,13	130,70
Não responsivo	2,53	-	0,28	82,65	21,61	Eficiente	3,14	-	1,12	225,41	239,39

⁽¹⁾R, responsivas; NR, não responsivas; I, ineficientes; e E, eficientes. ⁽²⁾Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Scott & Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Produtividade relativa (P_{REL}) e classificação⁽¹⁾ de linhagens com base na produtividade, e eficiências de recuperação aparente (E_{REC}), fisiológica (E_{FISIO}) e agrônômica (E_{AGRO}) em dois níveis de adubação fosfatada, em sorgo (*Sorghum bicolor*) granífero⁽²⁾.

Linhagem	Classe	P_{REL} (%)	E_{REC} -----	E_{FISIO} (kg kg ⁻¹)	E_{AGRO} -----
ARG1	IR	63,6a	0,26b	1,83a	23,97c
ATF13B	INR	60,9a	0,25b	1,76a	16,11d
ATF14B	INR	35,2c	0,27b	1,36a	8,71e
ATF40B	ER	40,1c	0,30b	1,81a	14,16d
ATF53B	INR	68,3a	0,25b	1,85a	21,18c
ATF54 (f186)	IR	52,8b	0,15c	1,59a	23,28c
ATF54 (f206)	IR	50,0b	0,20c	1,73a	21,01c
ATF54 (f240)	IR	72,9a	0,08c	1,59a	35,28b
ATF54 (f596)	IR	42,8c	0,17c	0,86c	18,31d
ATF54 (f61)	IR	38,4c	0,21c	1,67a	14,34d
ATF54 (f64)	IR	54,8b	0,28b	1,55a	21,55c
ATF54B	INR	36,8c	0,22b	1,66a	15,33d
BR005R	ENR	0,2d	0,16c	2,19a	11,55d
BR007B	IR	65,1a	0,38b	1,87a	37,99b
BR008B	IR	65,2a	0,44a	1,72a	38,59b
BR012R	INR	20,8c	0,23b	0,76c	5,25e
BR012 (1B)	ENR	0,1d	0,36b	1,49a	0,06e
BR012 (2B)	INR	11,6d	0,27b	1,71a	3,21e
BR012 (R6)	ENR	0,4d	0,30b	1,52a	0,90e
BTX623	INR	33,9c	0,22b	1,23b	8,90e
CMSXS110	INR	33,4c	0,29b	1,20b	11,23d
CMSXS136	INR	33,2c	0,13c	0,57c	4,39e
CMSXS180R	ER	28,6c	0,23b	1,25c	11,92d
CMSXS225	ENR	3,5d	0,33b	1,99a	1,14e
CMSXS226	INR	31,5c	0,18c	1,33a	10,62d
CMSXS227	INR	23,2c	0,16c	0,99b	4,57e
IS3620C	INR	33,4c	0,16c	1,38a	7,49e
P9401	IR	78,4a	0,47a	1,91a	45,40a
P9405	ENR	21,4c	0,45a	0,32c	7,87e
QL3	IR	52,6b	0,35b	1,62a	25,43c
SC414-12E	IR	60,2a	0,28b	1,86a	30,52b
SC566	ER	40,0c	0,25b	1,64a	23,45c
Tx643 B	INR	7,7d	0,09c	2,05a	1,26e
Tx644 B	INR	42,1c	0,14c	1,69a	14,89d
Tx645 B	INR	53,6b	0,23b	1,50a	10,11d
TX7078R	IR	47,5b	0,46a	1,46a	18,68d
			Média		
Geral		39,01	0,26	1,51	15,80
ER		32,53	0,31	1,26	14,35
ENR		1,05	0,29	1,80	3,41
IR		57,25	0,29	1,64	27,26
INR		35,04	0,21	1,40	9,55

⁽¹⁾IR, ineficientes e responsivas; INR, ineficientes e não responsivas; ER, eficientes e responsivas; e ENR, eficientes e não responsivas. ⁽²⁾Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste de Scott & Knott, a 5% de probabilidade.

aestivum L.) por Ozturk et al. (2005), milho por Li et al. (2008) e sorgo por Rocha et al. (2010). De Campos et al. (2013) também observaram essa variação em espécies nativas da Austrália. Por meio de análises proteômicas, Li et al. (2008) demonstraram que a secreção de citrato, o metabolismo de açúcares e a proliferação de células da raiz são as principais razões para a maior tolerância a solos deficientes em P, no milho.

Quanto à responsividade das linhagens ao P, observou-se que oito foram agrupadas no grupo a, com maior P_{REL} (Tabela 4). Essas linhagens podem contribuir na geração de híbridos mais responsivos, por meio do aumento do aproveitamento do adubo fosfatado aplicado ao solo. Para o caráter E_{REC} , as linhagens P9401, TX7078R, P9405 e BR008B apresentaram maior recuperação de P (grupo a). Entretanto, a diferença entre os grupos responsivos (R) e não responsivos (NR) foi de apenas 0,07 kg kg⁻¹. Para E_{FISIO} , somente oito linhagens foram agrupadas entre as de pior desempenho (grupos b e c), e o caráter variou de 0,32 kg kg⁻¹ (P9405) a 2,19 kg kg⁻¹ (BR005R). Isso indica que a linhagem BR005R produziu, em média, 219 kg a mais de matéria seca de grãos, para cada quilograma de P, que as plantas no tratamento controle sob baixa disponibilidade de P. Segundo Lynch (2011), o custo metabólico da maior exploração do solo pelas raízes é componente importante no crescimento de plantas sob baixa disponibilidade de P. Os autores constataram que, fisiologicamente, a planta que investe em mais raízes pode acabar produzindo uma grande quantidade de tecido inativo, o que promoveria um gasto energético interno desnecessário e diminuiria sua produtividade.

A linhagem P9401 apresentou a maior E_{AGRO} , com alto desempenho em condições de adubação adequada e desempenho bem inferior sob deficiência de P (Tabela 4). No caso dessa linhagem, a maior E_{AGRO} deveu-se, principalmente, à baixa produtividade sob baixa disponibilidade de P, tendo-se produzido 45 kg de grãos para cada quilograma de P disponível a mais no tratamento controle, em comparação ao tratamento sem adubação fosfatada.

Dezesseis linhagens foram indicadas como adaptadas a condições de disponibilidade adequada de P, de acordo com a soma de postos dos caracteres: produtividade, E_{ABS} , E_{UTIL} e E_{USO} , estimados no tratamento controle; e P_{REL} , E_{REC} , E_{FISIO} e E_{AGRO} , estimados por equações com os dois níveis de disponibilidade de P. Essas linhagens

Tabela 5. Ranques das linhagens eficientes e responsivas de sorgo (*Sorghum bicolor*) com as respectivas classificações, com base na soma de postos dos caracteres avaliados.

Linhagem	Responsividade ao P ⁽¹⁾										Eficiência ao P ⁽²⁾						
	Prod	E _{ABS}	E _{UTIL}	E _{USO}	P _{REL}	E _{REC}	E _{FISIO}	E _{AGRO}	Soma	Cl	Prod	E _{ABS}	E _{UTIL}	E _{USO}	Soma	Cl	Cf
ARG1	15	21	11	15	6	16	8	7	99	R	31	29	15	31	106	I	IR
ATF13B	27	29	19	27	7	18	10	15	152	NR	34	35	2	34	105	I	INR
ATF14B	31	24	27	31	21	14	27	26	201	NR	27	32	5	27	91	I	INR
ATF40B	5	1	24	5	17	9	9	19	89	R	2	3	16	2	23	E	ER
ATF53B	25	27	14	25	3	17	7	11	129	R	35	34	7	35	111	I	IR
ATF54 (f186)	9	16	12	9	11	32	19	9	117	R	18	2	35	22	77	I	IR
ATF54 (f206)	11	20	7	11	13	26	11	12	111	R	17	13	28	17	75	I	IR
ATF54 (f240)	7	36	1	8	2	36	20	4	114	R	32	36	1	32	101	I	IR
ATF54 (f596)	10	7	23	10	15	28	33	14	140	R	10	1	36	9	56	E	ER
ATF54 (f61)	16	28	5	16	19	25	15	18	142	R	13	30	4	11	58	E	ER
ATF54 (f64)	13	11	22	14	9	13	21	10	113	R	25	6	34	25	90	I	IR
ATF54B	23	34	2	23	20	24	16	16	158	NR	15	11	26	12	64	E	ENR
BR005R	24	31	9	24	35	31	1	21	176	NR	1	22	3	1	27	E	ENR
BR007B	3	9	8	3	5	5	5	3	41	R	21	17	22	20	80	I	IR
BR008B	1	2	17	1	4	4	12	2	43	R	19	9	32	18	78	I	IR
BR012R	30	19	29	30	30	22	34	29	223	NR	24	20	27	24	95	I	INR
BR012 (1B)	34	6	36	34	36	6	24	36	212	NR	6	5	20	6	37	E	ENR
BR012 (2B)	26	18	31	26	31	15	13	32	192	NR	11	18	14	10	53	E	ENR
BR012 (R6)	29	14	34	29	34	10	22	35	207	NR	5	21	6	4	36	E	ENR
BTX623	28	22	26	28	22	23	30	25	204	NR	26	19	29	26	100	I	INR
CMSXS110	21	12	25	20	23	11	31	22	165	NR	16	15	21	15	67	E	ENR
CMSXS136	18	25	10	18	25	34	35	31	196	NR	9	4	33	13	59	E	ENR
CMSXS180R	12	17	16	13	27	21	29	20	155	NR	7	8	19	7	41	E	ENR
CMSXS225	22	10	32	22	33	8	3	34	164	NR	4	16	9	5	34	E	ENR
CMSXS226	20	23	15	21	26	27	28	23	183	NR	12	10	31	16	69	E	ENR
CMSXS227	33	30	28	33	28	30	32	30	244	NR	28	24	30	29	111	I	INR
IS3620C	32	33	21	32	24	29	26	28	225	NR	30	27	18	28	103	I	INR
P9401	4	5	13	4	1	1	4	1	33	R	33	31	11	33	108	I	IR
P9405	17	3	35	17	29	3	36	27	167	NR	8	14	12	8	42	E	ENR
QL3	8	8	18	7	12	7	18	6	84	R	14	12	24	14	64	E	ER
SC414-12E	6	15	6	6	8	12	6	5	64	R	23	23	17	23	86	I	IR
SC566	2	13	3	2	18	19	17	8	82	R	3	7	13	3	26	E	ER
Tx643 B	36	35	20	36	32	35	2	33	229	NR	29	25	25	30	109	I	INR
Tx644 B	19	32	4	19	16	33	14	17	154	NR	22	26	10	21	79	I	INR
Tx645 B	35	26	33	35	10	20	23	24	206	NR	36	33	23	36	128	I	INR
TX7078R	14	4	30	12	14	2	25	13	114	R	20	28	8	19	75	I	IR

⁽¹⁾Responsividade avaliada em condições adequadas de adubação fosfatada e de acordo com a relação entre as condições controle e estresse. ⁽²⁾Eficiência avaliada em condições de estresse. Prod, produtividade; E_{ABS}, eficiência de absorção; E_{UTIL}, eficiência de utilização; E_{USO}, eficiência de uso; P_{REL}, produtividade relativa; E_{REC}, eficiência de recuperação; E_{FISIO}, eficiência fisiológica; E_{AGRO}, eficiência agrônômica. Classificações (Cl, parcial; e Cf, final): R, responsivas; NR, não responsivas; I, ineficientes; E, eficientes; IR, ineficientes e responsivas; INR, ineficientes e não responsivas; ER, eficientes e responsivas; ENR, eficientes e não responsivas.

apresentaram pontuações entre 33 e 142 no ranque (Tabela 5). Para a eficiência produtiva, foram avaliados os caracteres produtividade, E_{ABS} , E_{UTIL} e E_{USO} , em condições de estresse, e também foram classificadas 16 linhagens, pela soma de postos, com pontuações entre 23 e 69 no ranque. As seguintes linhagens apresentaram, de forma simultânea, alta responsividade e alta eficiência produtiva em relação ao P: ATF40B, ATF54 (f61), ATF54 (f596), QL3 e SC566. Essas linhagens, portanto, devem ser priorizadas para a formação de híbridos que podem ser destinados a diferentes nichos de mercado, que demandem tanto o emprego de alta quanto de baixa tecnologia.

Cabe destacar que a classificação com uso da produtividade apenas, apesar de simples, foi eficiente em classificar as linhagens como responsivas, tendo apresentado 92% de coincidência com a classificação obtida com a soma de postos de Mulamba & Mock (1978), na avaliação com níveis adequados de P (Tabela 5). Quanto à eficiência produtiva em relação ao P, a classificação de acordo com a produtividade apresentou 78% de coincidência com a classificação pela soma de postos. Deve-se ressaltar, porém, que o uso da produtividade como único caráter identificador de linhagens eficientes e responsivas ao fósforo, embora adequado, deve restringir-se às fases iniciais do programa de melhoramento, quando se avalia elevado número de linhagens. Por fim, é importante mencionar a pertinência da avaliação de doses intermediárias de P, que poderiam promover alterações metabólicas benéficas à produtividade nas plantas.

Conclusões

1. Há variabilidade entre as linhagens de sorgo (*Sorghum bicolor*) granífero quanto à eficiência produtiva e à responsividade ao fósforo, o que aponta para a possibilidade de obtenção de híbridos para diferentes nichos de mercado.

2. A classificação das linhagens de acordo apenas com a produtividade é capaz de identificar e discriminar linhagens eficientes e responsivas ao fósforo, em sorgo granífero.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela bolsa de apoio técnico; e à Fundação McKnight, pelo apoio financeiro.

Referências

- CRUZ, C.D. **Programa Genes**: biometria. Viçosa: Ed. da UFV, 2006. 382p.
- DE CAMPOS, M.C.R.; PEARSE, S.J.; OLIVEIRA, R.S.; LAMBERS, H. Downregulation of net phosphorus-uptake capacity is inversely related to leaf phosphorus-resorption proficiency in four species from a phosphorus-impooverished environment. **Annals of Botany**, v.111, p.445-454, 2013. DOI: 10.1093/aob/mcs299.
- 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. Agronomy**, v.35, p.31-38, 2013. DOI: 10.4025/actasciagron.v35i1.15237.
- FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G.V.; DELIMA, R.O.; SOUZA, L.V.D.; SILVA, J.D. Inheritance of traits associated with phosphorus utilization efficiency in maize. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.465-471, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000500005.
- GODFRAY, H.C.J.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.M.; TOULMIN, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v.327, p.812-818, 2010. DOI: 10.1126/science.1185383.
- 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**, v.9, p.597-605, 2004. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.10.008.
- LI, K.; XU, C.; LI, Z.; ZHANG, K.; YANG, A.; ZHANG, J. Comparative proteome analyses of phosphorus responses in maize (*Zea mays* L.) roots of wild-type and a low-P-tolerant mutant reveal root characteristics associated with phosphorus efficiency. **Plant Journal**, v.55, p.927-939, 2008. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2008.03561.x.
- LUO, L.; WANG, X.C.; GUO, W.; NGO, H.H.; CHEN, Z. Impact assessment of excess discharges of organics and nutrients into aquatic systems by thermodynamic entropy calculation. **Journal of Environmental Management**, v.112, p.45-52, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.011.
- LYNCH, J.P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, v.156, p.1041-1049, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175414.
- MALINGREAU, J.-P.; EVA, H.; MAGGIO, A. **NPK: will there be enough plant nutrients to feed a world of 9 billion in 2050?** Luxembourg: European Commission, 2012. 30p. (Foresight and horizon scanning series). DOI: 10.2788/26603.
- MCGILL, S.M. 'Peak' phosphorus? The implications of phosphate scarcity for sustainable investors. **Journal of Sustainable Finance and Investment**, v.2, p.222-239, 2012. DOI: 10.1080/20430795.2012.742635.
- MULAMBA, N.-N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egyptian Journal of Genetics and Cytology**, v.7, p.40-51, 1978.

- OLIVEIRA, T.C. de; SILVA, J.; SALGADO, F.H.M.; SOUSA, S.A.; FIDELIS, R.R. Eficiência e resposta à aplicação de fósforo em feijão comum em solos de cerrado. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, p.16-24, 2012.
- OZTURK, L.; EKER, S.; TORUN, B.; CAKMAK, I. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and Soil**, v.269, p.69-80, 2005. DOI: 10.1007/s11104-004-0469-z.
- PARENTONI, S.N. **Estimativa de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical**. 2008. 207p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- RAMAEKERS, L.; REMANS, R.; RAO, I.M.; BLAIR, M.W.; VANDERLEYDEN, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. **Field Crops Research**, v.117, p.169-176, 2010. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.03.001.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S. da; GATIBONI, L.C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.21-28, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000100003.
- ROCHA, M.C. da; MIRANDA, G.V.; VASCONCELOS, M.J.V.; MAGALHÃES, P.C.; CARVALHO JÚNIOR, G.A. de; SILVA, L.A.; SOARES, M.O.; CANTÃO, F.R.O.; RODRIGUES, F.; SCHAFFERT, R.E. Caracterização da morfologia radicular de genótipos contrastantes de sorgo em baixos e altos níveis de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, p.65-78, 2010.
- SANTOS, D.R. dos; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, p.576-586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049.
- SCHAFFERT, R.E.; ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E.; BAHIA, A.F.C.; SANTOS, F.G. Genetic variability in sorghum for P efficiency and responsiveness. **Plant Nutrition**, v.92, p.72-73, 2001. DOI: 10.1007/0-306-47624-X_34.
- SISTEMA brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

Recebido em 11 de fevereiro de 2014 e aprovado em 5 de agosto de 2014