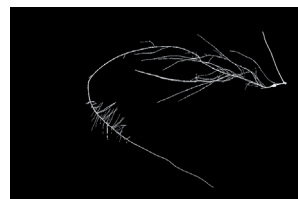
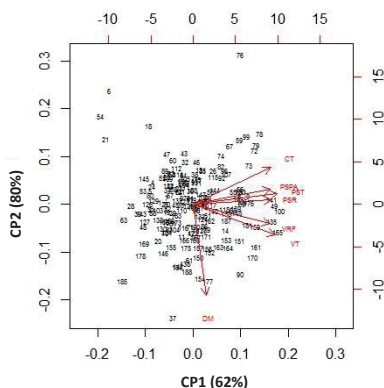


Caracterização Morfológica de Acessos do Painel de Diversidade de Sorgo Avaliados em Solução Nutritiva sob Baixo Fósforo



ISSN 1679-0154

Dezembro, 2017

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Milho e Sorgo

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 158

Caracterização Morfológica de Acessos do Paineiro de Diversidade de Sorgo Avaliados em Solução Nutritiva sob Baixo Fósforo

Bárbara França Negri

Karine da Costa Bernardino

Maria Marta Pastina

Jurandir Vieira Magalhães

Sylvia Moraes de Sousa

Embrapa Milho e Sorgo

Sete Lagoas, MG

2017

Esta publicação está disponível no endereço:

<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45

Caixa Postal 151

CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Fone: (31) 3027-1100

Fax: (31) 3027-1188

www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Sidney Netto Parentoni

Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau

Membros: Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia Maria Borges

Damasceno, Maria Lúcia Ferreira Simeone, Roberto dos Santos

Trindade, Paulo Eduardo de Aquino Ribeiro, Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro

Tratamento de ilustrações: Tânia Mara Assunção Barbosa

Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa

Foto(s) da capa: Sylvia Moraes de Sousa

1ª edição

Formato digital (2017)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Milho e Sorgo

Caracterização morfológica de acessos do painel de diversidade de sorgo avaliados em solução nutritiva sob baixo fósforo / Bárbara França Negri ... [et al.]. – Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2017.

25 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 158).

1. Genética. 2. Sistema radicular. 3. *Sorghum bicolor*. I. Negri, Bárbara França. II. Bernardino, Karine da Costa. III. Pastina, Maria Marta. IV. Magalhães, Jurandir Vieira. V. Sousa, Sylvia Moraes de. VI. Série.

CDD 576.5 (21. ed.)

© Embrapa 2017

Sumário

Resumo	4
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	11
Conclusões	18
Agradecimentos	19
Referências	19

Caracterização Morfológica de Acessos do Paineiro de Diversidade de Sorgo Avaliados em Solução Nutritiva sob Baixo Fósforo

Bárbara França Negri¹

Karine da Costa Bernardino²

Maria Marta Pastina³

Jurandir Vieira Magalhães⁴

Sylvia Moraes de Sousa^{5*}

Resumo

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para plantas, e sua aquisição depende do sistema radicular da planta. Em terras aráveis, P é um dos macronutrientes mais indisponíveis e frequentemente limita o crescimento e a produtividade das plantas cultivadas. Portanto, uma melhor compreensão de como as plantas respondem à deficiência de P é necessária para produzir variedades com maior eficiência de uso deste nutriente. Este estudo teve como objetivo analisar

¹Doutoranda em Bioengenharia, bolsista CAPES, Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Doutor Augusto Chagas Viegas 17, CEP 36300-088 São João del-Rei, MG, barbarafrnegri@gmail.com

²Doutoranda em Melhoramento Genético de Plantas, bolsista CAPES, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, CEP 36570-900 Viçosa, MG, karinecosta23@gmail.com

³Eng.-Agrôn., Ph.D., Pesquisadora em Genética e Melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424 Km 45, Zona Rural, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG, marta.pastina@embrapa.br

⁴Eng.-Agrôn., Ph.D., Pesquisador em Genética e Melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424 Km 45, Zona Rural, CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG, jurandir.magalhaes@embrapa.br

⁵Bióloga, Ph.D., Pesquisadora em Biologia Molecular da Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424 Km 45, Zona Rural, CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG, sylvia.sousa@embrapa.br *Autora correspondente.

as características radiculares relacionadas à eficiência de aquisição de P em um paineiro de sorgo, composto por acessos do programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo e do CIRAD, totalizando 190 genótipos. As sementes de sorgo foram germinadas durante quatro dias em rolos de germinação e depois colocadas em um sistema de pastas de papel com solução nutritiva modificada de Magnavaca (P - 2,5 μ M) em condições controladas. Após 13 dias, as imagens das raízes foram capturadas usando um sistema de fotografia digital e analisadas utilizando o programa RootReader2D e o software WinRHIZO. A raiz e a parte aérea foram secas separadamente a 65 °C em uma estufa de ar forçado até a obtenção de peso constante. O comprimento total da raiz correlacionou positivamente com o volume radicular total e de raízes superfinae e peso seco e negativamente com o diâmetro médio. O baixo coeficiente de variação (10,04 - 25,33%) e a herdabilidade média a alta (30,9 - 85,18%) foram encontrados para todas as características radiculares (comprimento total da raiz, diâmetro médio da raiz, volume total da raiz e volume de raízes superfinae) e de peso seco analisadas. A Análise de Componentes Principais foi capaz de diferenciar genótipos de sorgo contrastantes com base nas características avaliadas. O primeiro componente principal (PC1) explicou 62%, enquanto o segundo componente principal (PC2) explicou 18% da variabilidade fenotípica. Esses dados darão suporte à análise de associação para identificar genes candidatos relacionados à morfologia da raiz e à eficiência de aquisição de P no sorgo.

Palavras-chave: raiz, hidroponia, aquisição de P.

Morphological Characterization of Sorghum Diversity Panels Accessions Assessed in Nutrient Solution Under Low Phosphorus

Bárbara França Negri¹

Karine da Costa Bernardino²

Maria Marta Pastina³

Jurandir Vieira Magalhães⁴

Sylvia Morais de Sousa^{5}*

Abstract

Phosphorus (P) is an essential macronutrient for plants and its acquisition relies on plant root system. In arable land, P is one of the most unavailable macronutrients and frequently limits plant growth, limiting the productivity of *crop* plants. Therefore, a better understanding of how plants respond to P starvation is necessary to breed crop varieties with enhanced P use efficiency. This study aimed to analyze root traits related to P acquisition efficiency in a sorghum panel, composed of breeding accessions from Embrapa Milho e Sorgo and CIRAD, totaling 190 genotypes. Sorghum seeds were germinated for four days on germination rolls and then placed in a paper pouch system with modified Magnavaca nutrient solution (P - 2.5 μ M), in controlled conditions. After 13 days, root images were captured using a digital photography setup and analyzed using both RootReader2D program and WinRHIZO software. Root and shoot were dried separately at 65 °C in a forced-air oven until constant weight was obtained. Root length positively correlated with total, superfine root volume and dry weight and

negatively with average diameter. Low coefficient of variation (10.04 – 25.33%) and medium to high heritability (30.9 – 85.18%) were found for all root (total root length, average root diameter, total root volume and volume of superfine roots) and dry weight traits analyzed. Principal Component Analysis was able to differentiate contrasting sorghum lines based in the selected root traits and dry weight. The first principal component (PC1) explained 62% while the second principal component (PC2) explained 18% of the phenotypic variation. These data will give support to association analysis in order to identify candidate genes related to root morphology and P acquisition efficiency in sorghum.

Keywords: root, hydroponics, P-acquisition.

Introdução

A implementação de insumos fosfatados em práticas agrônômicas eleva a produtividade de culturas e permite que a produção agrícola seja capaz de atender à crescente demanda demográfica, principalmente em países com solos tropicais, como o Brasil (CORDELL et al., 2009). Por outro lado, a aplicação demasiada de insumos fosfatados acarreta aumento dos custos de produção e pode causar impacto ambiental, como a contaminação dos mananciais hídricos (SHARPLEY et al., 2001). Além disso, as rochas fosfatadas utilizadas na fabricação de fertilizantes fosfatados são consideradas recursos finitos, podendo suas reservas se esgotarem em 2030, caso a exploração para fabricação de insumos continue no mesmo patamar ou aumente (VANCE; CHIOU, 2011).

A eficiência de aquisição de fósforo (P) está diretamente relacionada com a capacidade das plantas de absorverem P do solo e essa capacidade é diretamente relacionada a um sistema radicular capaz de explorar o solo de forma eficiente (MOLL et al., 1982). A exploração da variabilidade genética é uma alternativa para desenvolver cultivares mais adaptadas a condições limitantes de P (GOOD et al., 2004). Plantas que são adaptadas às condições limitantes de P desenvolveram inúmeras modificações, entre elas, mudanças na morfologia e na arquitetura da raiz, resultando em maior disponibilização de P na rizosfera, favorecendo a absorção de P e a manutenção do metabolismo da planta (LYNCH, 2007). A avaliação de plântulas em solução nutritiva é uma alternativa que possibilita a análise de um grande número de genótipos, uma vez que não é tão trabalhosa quando comparada à fenotipagem em campo (TRACHSEL et al., 2011). Além disso, a avaliação do sistema radicular em estádios iniciais de desenvolvimento pode ser usada para mapeamento de locos de características *quantitativas* (QTL) (ZHU; LYNCH, 2004; ZHU et al., 2005a, 2005b) e associativo (HUFNAGEL et al., 2014) para características relacionadas à eficiência no uso de P.

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é o quinto cereal mais consumido no mundo, sendo fonte de alimentação para mais de meio bilhão de pessoas. A previsão da sua produtividade para a safra de 2017/2018 é de aproximadamente 60 milhões de toneladas (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2017). O sorgo tem se destacado nos últimos anos em razão da sua versatilidade de uso, que se estende desde seu uso como alimento humano e animal até matéria-prima para a produção de álcool anidro, bebidas alcoólicas e produção de tintas (FREITAS et al., 2012). Além disso, tem sido proposta a

sua utilização como uma alternativa para a produção de etanol lignocelulósico (DAMASCENO et al., 2010). É considerado uma cultura adaptada a condições áridas e semiáridas (DOUMBIA et al., 1993, 1998) e grande parte do seu cultivo está localizado em solos com baixas concentrações de fósforo. Diversos painéis de associação foram desenvolvidos para representar o germoplasma mundial de sorgo (DEU et al., 2006; CASA et al., 2008; UPADHYAYA et al., 2009). Esses painéis foram utilizados para *estudos de associação* ampla do *genoma* (GWAS) de várias características, incluindo eficiência no uso de P (HUFNAGEL et al., 2014). Alguns estudos evidenciam o desafio de dissecar características adaptativas estruturadas em diversos painéis de associação (MORRIS et al. 2013a, 2013b; LASKY et al., 2015), mostrando a necessidade de se ampliar as populações a serem analisadas. Além disso, apesar de existirem evidências de que modificações na morfologia e na arquitetura do sistema radicular são mecanismos essenciais para a adaptação de plantas a solos com baixo P, até o momento, poucos genes que afetam o sistema radicular e a eficiência no uso de P foram descritos. Portanto, este trabalho teve como objetivo caracterizar um painel de sorgo com acessos da Embrapa Milho e Sorgo e do CIRAD avaliados em solução nutritiva sob baixo P quanto a morfologia radicular e a peso seco de plântulas.

Material e Métodos

Foram avaliados 190 acessos pertencentes ao painel de diversidade de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo e do Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD – França). As sementes de sorgo foram desinfetadas com hipoclorito de sódio 0,5% por 5 minutos, lavadas com água deionizada e germinadas em papel

de germinação em câmara de crescimento. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com três repetições. Após quatro dias, foram selecionadas três plântulas uniformes para cada uma das repetições biológicas e colocadas em solução nutritiva de Magnavaca modificada (pH 5,65) (MAGNAVACA et al., 1987) com $2,5 \mu\text{M}$ de P (baixo P) em um sistema composto de pastas de arquivo forradas com papel de germinação (HUND et al., 2009). Os experimentos foram realizados em câmara de crescimento com temperatura diurna média de $27 \pm 3^\circ\text{C}$, noturna de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e fotoperíodo de 12 horas, sob aeração contínua sendo a solução nutritiva trocada a cada três dias (SOUSA et al., 2012). Após 13 dias, o sistema radicular foi fotografado com uma câmera digital (Nikon D300S SLR). As imagens obtidas foram analisadas com o auxílio dos softwares RootReader2D e WinRhizo v. 4.0 (Regent Systems, Quebec, Canadá), sendo quantificadas quatro características de morfologia radicular: comprimento total (cm), diâmetro médio (mm), volume total de raízes (cm^3) e o volume de raízes superfinais com o diâmetro entre 0 e 1 mm (cm^3).

Após fotografado o sistema radicular, a parte aérea e as raízes das plântulas foram secas separadamente em uma estufa a 65°C até peso constante e pesadas com o auxílio de uma balança analítica, obtendo-se assim o peso seco da parte aérea (g), peso seco da raiz (g) e peso seco total da planta (g).

A análise de variância (ANOVA) foi realizada no software GENES (CRUZ, 2006) onde foi possível estimar os componentes de variância, as médias, os valores fenotípicos máximos, mínimos e as estimativas de herdabilidade, coeficiente de variação, variância fenotípica, variância genética e variância ambiental

para as quatro características radiculares e peso seco da parte aérea, raiz e total.

Foi realizado um histograma para a distribuição de cada uma das características e uma análise de correlação de Pearson usando o pacote “psych” do programa estatístico R v. 3.3.1 (R CORETEAM, 2016), assim como a análise de componentes principais, utilizando a função princomp do pacote “Stats”.

Resultados e Discussão

A dissecação genética de características quantitativas em diferentes espécies fornece informações valiosas sobre a biologia vegetal (NORDBORG; WEIGEL, 2008; OLSEN; WENDEL, 2013) e facilita a criação de variedades melhoradas (BERNARDO, 2010; COOPER et al., 2014). Até o momento, a maioria dos QTLs para características adaptativas foram identificadas usando mapeamento biparental utilizando populações de linhagens endogâmicas recombinantes (RILs) (MICKELBART et al., 2015). No entanto, o mapeamento biparental é limitado pela falta de diversidade alélica, que limita a caracterização da arquitetura genética e a falta de eventos de recombinação, o que limita a resolução do mapeamento (MYLES et al., 2009). Os *estudos de associação* ampla do *genoma* (GWAS) capturam maior diversidade alélica e mais eventos de recombinação, mas a estrutura da população resultante do isolamento ou adaptação pode levar a associações falsas e sintéticas (PLATT et al., 2010; BRACHI et al., 2011), sendo interessante a análise associativa em painéis diversos. A primeira etapa para realização de estudos associativos é ter uma população fenotipada para as características de interesse.

Neste trabalho, foram analisadas características de morfologia radicular e peso seco de 190 acessos de um painel de diversidade de sorgo crescidos em solução nutritiva sob baixo P. A análise de variância mostrou que todas as variáveis analisadas nesse painel foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F. Além disso, o coeficiente de variação variou de 10,04 a 25,33 (Tabela 1), ficando dentro do esperado para as características analisadas, uma vez que resultados similares foram observados para uma população de recombinação ao acaso de sorgo para a tolerância ao alumínio e eficiência na utilização de fósforo (BERNARDINO et al., 2016) e para RILs derivadas do cruzamento entre dois genitores contrastantes para produção de grãos em campo e aquisição de P (NEGRI et al., 2014). Alta herdabilidade, acima de 60%, foi encontrada para quase todas as características, exceto para diâmetro médio da raiz (30,90%), indicando boa precisão experimental para estimativa dos efeitos genéticos. A baixa herdabilidade para diâmetro médio no painel de sorgo pode estar relacionada à pequena variação dessa característica dentro dessa população (0,69 a 1,88 mm), sendo que o mesmo foi observado para RILs de sorgo (NEGRI et al., 2014). Resultados fenotípicos similares foram observados para um subconjunto do painel associativo (*Sorghum Association Panel Subset - SAPst*) descrito por Casa et al. (2008), com 287 acessos contendo linhagens tropicais convertidas para sensibilidade ao fotoperiodismo e porte baixo (HUFNAGEL et al., 2014; MAGALHÃES et al., 2016), analisados no mesmo sistema de fenotipagem. A variância fenotípica de todas as características analisadas, com exceção de diâmetro médio, foi explicada pela variância genética e não pela variância ambiental.

Tabela 1. Média, valor fenotípico máximo, mínimo, coeficiente de variação (CV), herdabilidade (h^2), variância fenotípica (VF), genotípica (VG) e ambiental (VE) das características comprimento radicular total (CT), diâmetro médio da raiz (DM), volume radicular total (VT), volume de raízes superfina (0-1 mm) (VRF), peso seco da parte aérea (PSPA), radicular (PSR) e total (PST) dos 190 genótipos de sorgo.

Variável	Média	Máximo	Mínimo	CV (%)	h^2 (%)	VF	VG	VE
CT (cm)	389,22	973,52	81,19	19,45	76,39	8644,99	6604,39	2040,60
DM (mm)	1,17	1,88	0,69	10,04	30,90	0,007	0,002	0,005
VT (cm³)	4,11	9,55	0,84	22,91	61,86	0,83	0,51	0,32
VRF (cm³)	2,36	5,52	0,33	25,33	62,90	0,34	0,21	0,13
PSPA (g)	0,02	0,06	0,003	22,37	81,41	0,00005	0,00004	0,00001
PSR (g)	0,02	0,07	0,001	20,99	79,55	0,00004	0,00003	0,00001
PST (g)	0,05	0,10	0,01	17,98	85,18	0,00016	0,00014	0,00024

Na distribuição de frequência, os extremos do gráfico tiveram um menor número de genótipos para todas as características (Figura 1), como esperado para caracteres de herança quantitativa. Quase todas as correlações foram significativas a 1% de probabilidade, com exceção das correlações fenotípicas entre diâmetro médio e peso seco (parte aérea, raiz e total). O diâmetro médio apresentou correlação negativa com comprimento radicular, indicando que quanto maior o comprimento radicular, menor o diâmetro médio da raiz. Com exceção do diâmetro médio, todas as outras características radiculares apresentaram correlações fenotípicas de média alta e significativas com o peso seco total (Figura 1), demonstrando que o sistema radicular contribuiu com uma maior produção de biomassa. Resultados similares foram observados tanto em RILs de milho (ZHU; LYNCH, 2004) quanto de sorgo (NEGRI et al., 2014) provenientes de parentais

contrastantes para comprimento radicular e eficiência no uso de P, onde foi encontrada correlação positiva entre o crescimento radicular e o peso seco da planta e uma correlação negativa entre comprimento radicular e diâmetro médio da raiz. A baixa disponibilidade de P altera a arquitetura radicular de várias culturas, o que inclui a inibição do crescimento da raiz primária e o aumento do número e comprimento das seminais, laterais e pelos radiculares, o que facilita o forrageamento do solo (MAHARAJAN et al., 2017).

A análise de componentes principais permitiu diferenciar genótipos de sorgo contrastantes com base nas sete características analisadas. O primeiro componente principal (CP1) explicou 62% enquanto o segundo componente principal (CP2) explicou 18% da variabilidade fenotípica, somando um total de 80% (Tabela 2). O CP1 teve coeficientes positivos de autovetores para todas as variáveis, enquanto o CP2 teve coeficiente negativo para as características diâmetro médio, volume radicular total e volume de raízes superfinais (Tabela 2). O CP1 foi explicado de forma homogênea por quase todas as características analisadas, exceto diâmetro médio. O CP2 teve maior explicação pelo diâmetro médio, apresentando valores negativos (-0,85) (Tabela 2). Estas análises permitiram a identificação de genótipos contrastantes com base nas características analisadas, cuja diversidade está exemplificada na Figura 3. A Figura 3 mostra alguns exemplos de genótipos com morfologia do sistema radicular contrastante, incluindo os genótipos BR007B (Figura 3A) e SC283 (Figura 3B), que são parentais contrastantes das RILs de sorgo caracterizadas anteriormente em solução nutritiva (NEGRI et al., 2014).

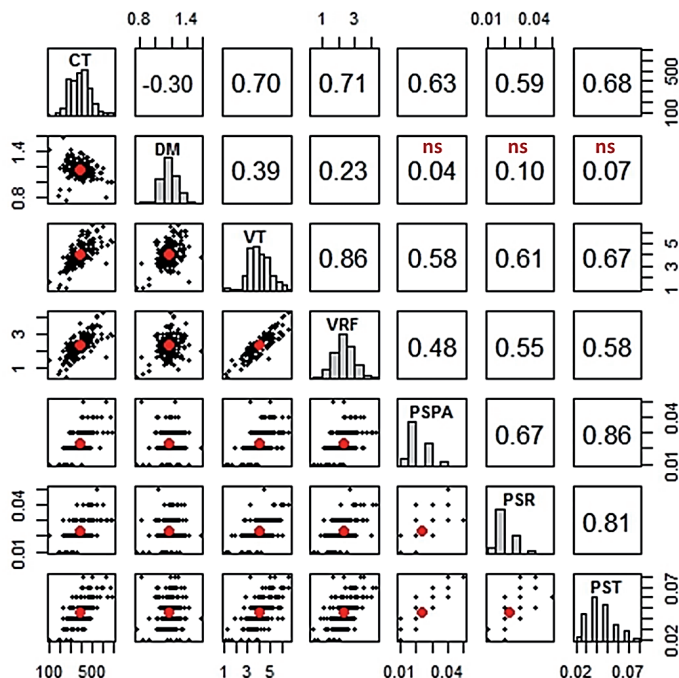


Figura 1. Matriz de Correlação de Pearson do comprimento total (CT) (cm), diâmetro médio (DM) (mm), volume total de raiz (VT) (cm³), volume total de raízes superfina (VRF) (0-1 cm²), peso seco da parte aérea (PSPA) (g), peso seco da raiz (PSR) (g) e peso seco total (PST) (g) dos 190 genótipos do paineiro de diversidade de sorgo. A análise foi realizada com plântulas após 13 dias de crescimento em baixo P em sistema hidropônico.

Uma dissecação genética detalhada e a compreensão das características radiculares utilizando recursos genéticos naturais são essenciais para desvendar a arquitetura genética da eficiência a P e gerar materiais mais eficiente sob condição de estresse. O melhoramento de plantas sob estresse é um dos maiores desafios da agricultura diante do cenário de mudanças

climáticas e da exigência do aumento de produção para uma população crescente.

Tabela 2. Análise de componentes principais para as características de raiz e de peso seco. O desvio padrão, a proporção de variância e a proporção acumulada da variância total (%) explicada são mostradas para cada componente principal.

Variáveis	CP1	CP2
Comprimento total (cm)	0,40	0,34
Diâmetro médio (mm)	0,07	-0,85
Volume total (cm ³)	0,42	-0,29
Volume de raízes entre 0-1 mm (cm ³)	0,39	-0,18
Peso seco da parte aérea (g)	0,40	0,14
Peso seco da raiz (g)	0,40	0,04
Peso seco total (g)	0,43	0,10
Desvio Padrão	2,08	1,13
Proporção da Variância	0,62	0,18
Variância acumulada (%)	62,0	80,0

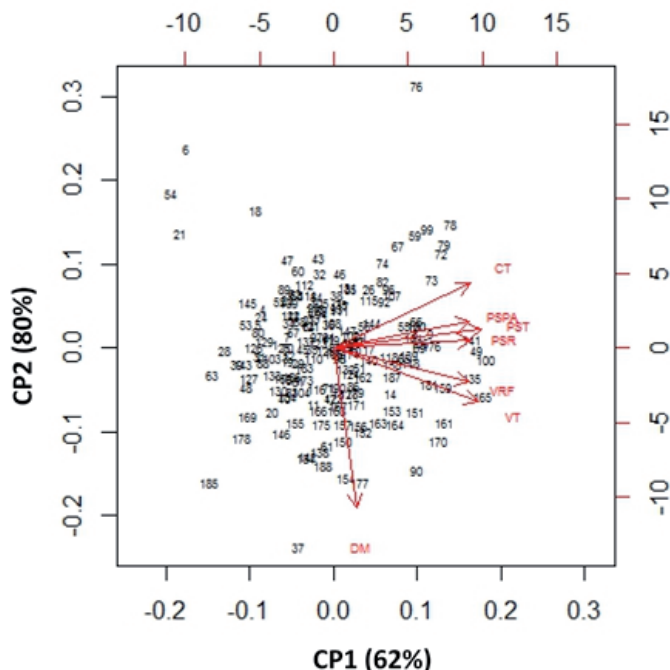


Figura 2. Análise de componentes principais para as características comprimento da raiz, diâmetro médio da raiz, volume total das raízes e volume de raízes finas, peso seco da parte aérea, peso seco da raiz e peso seco total da planta. A proporção cumulativa da variância total de cada componente principal (CP1 e CP2) é mostrada em cada eixo. A análise foi feita com plântulas após 13 dias de crescimento em baixo P em sistema hidropônico.

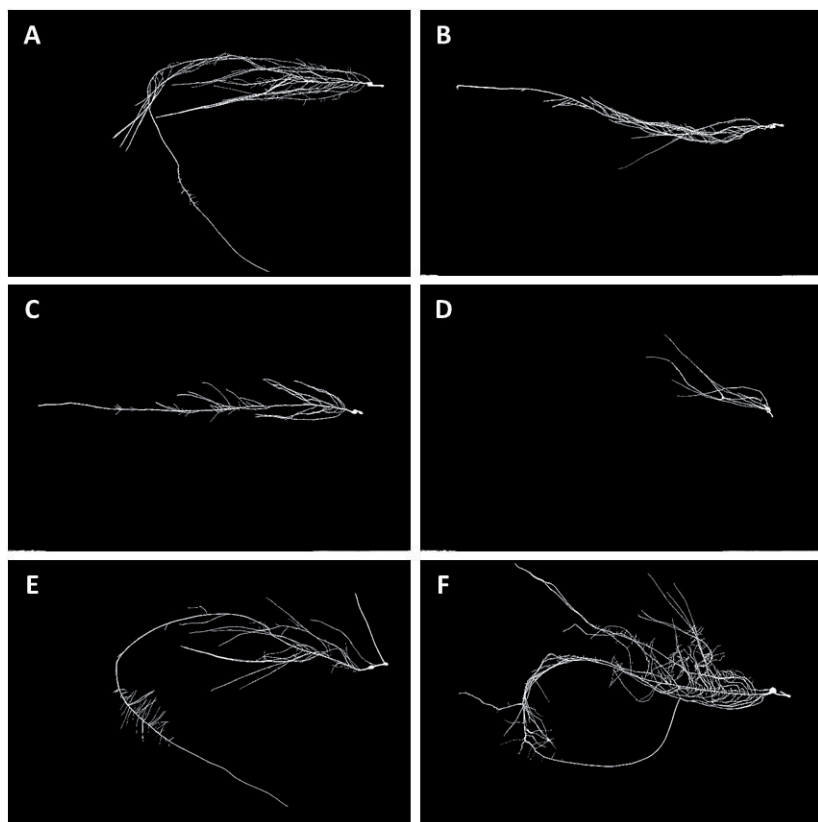


Figura 3. Imagens das raízes de acessos do painel de sorgo crescidos em solução nutritiva de $\frac{1}{2}$ Magnavaca sob baixo P (2,5 μ M) 13 dias após início do tratamento. (A) BR007B, (B) SC283 e (C-F) genótipos contrastantes para morfologia radicular.

Conclusões

Os genótipos do painel de sorgo apresentam variabilidade genética para todas as características analisadas em condições de baixa disponibilidade de fósforo.

Um maior comprimento e/ou área de superfície e menor diâmetro médio resultaram no aumento de biomassa das plântulas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Gislene Rodrigues Braga Cristeli pela ajuda na montagem dos experimentos em câmara de crescimento. Agradecem também à Embrapa pelo apoio financeiro.

Referências

BERNARDINO, K. da C.; MENEZES, C. B. de; PASTINA, M. M.; SOUSA, S. M. de; GUIMARÃES, C. T.; SOUZA, D. A. de; SCHAFFERT, R. E.; MAGALHÃES, J. V. de. **Caracterização de uma população de recombinação ao acaso de sorgo para a tolerância ao alumínio e eficiência na utilização de fósforo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 148).

BERNARDO, R. N. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury: Stemma Press, 2010.

BRACHI, B.; MORRIS, G. P.; BOREVITZ, J. O. Genome-wide association studies in plants: the missing heritability is in the field. **Genome Biology**, v. 12, p. 232, 2011.

CASA, M.; PRESSOIR, G.; BROWN, P. J.; MITCHELL, S. E.; ROONEY, W. L.; TUINSTRA, M. R.; FRANKS, C. D.; KRESOVICH, S. Community resources and strategies for association

mapping in sorghum. *Crop Science*, Madison, v. 48, n. 1, p. 30-40, 2008.

COOPER, M.; MESSINA C. D.; PODLICH, D.; TOTIR, L. R.; BAUMGARTEN, A.; HAUSMANN, N. J.; WRIGHT, D.; GRAHAM, G. Predicting the future of plant breeding: complementing empirical evaluation with genetic prediction. **Crop and Pasture Science**, *Victoria*, v. 65, n. 4, p. 311-336, 2014.

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

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: biometria. Viçosa, MG: UFV, 2006. 382 p.

DAMASCENO, C. M. B.; PARRELLA, R. A. C.; SIMEONE, M. L. P.; SCHAFFERT, R. E.; MAGALHÃES, J. V. Caracterização bioquímica de genótipos de sorgo quanto ao teor de lignina e análise molecular de rotas metabólicas visando à produção de etanol de segunda geração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MILHO E SORGO, 28., SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE LAGARTA DO CARTUCHO, 4., 2010, Goiânia. **Potencialidades, desafios e sustentabilidade**: resumos expandidos. Goiânia: ABMS, 2010. 1 CD-ROM.

DEU, M.; RATTUNDE, F.; CHANTEREAU, J. A global view of genetic diversity in cultivated sorghums using a core collection. **Genome**, Ottawa, v. 49, n. 2, p. 168-180, 2006.

DOUMBIA, M. D.; HOSSNER, L. R.; ONKEN, A. B. Sorghum growth in acid soils of West Africa: variations in soil chemical

properties. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, v. 12, n. 2, p. 179-190, 1998.

DOUMBIA, M. D.; HOSSNER, L. R.; ONKEN, B. Variable sorghum growth in acid soils of subhumid West Africa. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, v. 7, p. 335-346, 1993.

FREITAS, G. A.; SOUSA, C. R.; CAPONE, A.; AFFÉRI, F. S.; MELO, A. V.; SILVA, R. R. Adubação orgânica no sulco de plantio e sua influência no desenvolvimento do sorgo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 3, n. 1, p. 61-67, 2012.

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**, Oxford, v. 9, n. 12, p. 597-605, 2004.

HUND, A.; TRACHSEL, S.; STAMP, P. Growth of axile and lateral roots of maize: I development of a phenotyping platform. **Plant and Soil**, The Hague, v. 325, n. 1/2, p. 335-349, 2009.

HUFNAGEL, B.; SOUSA, S. M.; ASSIS, L.; GUIMARÃES, C. T.; LEISER, W.; CORRADI, G.; NEGRI, B.; LARSON, B. G.; SHAFF, J. E.; PASTINA, M. M.; WELTZIEN, E.; RATTUNDE, F.; VIANA, J. H.; CLARK, R.; FALCÃO, A.; GAZAFFI, R.; GARCIA, A. A. F.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHÃES, J. V. Duplicate and conquer: multiple homologs of phosphorus-starvation tolerance 1 enhance phosphorus acquisition and sorghum performance on low-P soils. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 166, p. 659-677, 2014.

LASKY, J. R.; UPADHYAYA, H. D.; RAMU, P.; DESHPANDE, S.; HASH, C. T.; BONNETTE, J.; THOMAS E. JUENGER, T. E.; HYMA, K.; ACHARYA, C.; MITCHELL, S. E.; BUCKLER, E. S.; BRENTON, Z.; KRESOVICH, S.; MORRIS, G. P. Genome-environment associations in sorghum landraces predict adaptive traits. **Science Advances**, v. 1, n. 6, p. 1-13, 2015.

LYNCH, J. P. Roots of the second Green Revolution. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 55, n. 5, p. 493-512, 2007.

MAGALHÃES, J. V.; MACIEL, B. H.; SOUSA, S. M. de; SILVA, L. A.; SCHAFFERT, R. E.; PASTINA, M. M.; BARROS, B. de A.; GUIMARÃES, C. T.; NEGRI, B.; AZEVEDO, G.; VIANA, J. H. **M. Validação de marcadores moleculares para eficiência na utilização de fósforo com base em genes SbPSTOL1 em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 10 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 219).

MAGNAVACA, R.; GARDNER, C. O.; CLARK, R. B. Evaluation of maize inbred lines for aluminum tolerance in nutrient solution. In: GABELMAN, H. W.; LONGHMAN, B. C. (Ed.). Genetic aspects of plant mineral nutrition. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. p. 255-265.

MAHARAJAN, T.; CEASAR, S. A.; KRISHNA, T. P. A.; RAMAKRISHNAN, M.; DURAI PANDIYAN, V.; ABDULLA, A. D. N.; IGNACIMUTHU, S. Utilization of molecular markers for improving the phosphorus efficiency in crop plants. **Plant Breeding**, Berlin, p. 1-17, 2017.

MICKELBART, M. V.; HASEGAWA, P. M.; BAILEY-SERRES, J. Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to

crop yield stability. **Nature Reviews Genetics**, London, v. 16, n. 4, p. 237-251, 2015.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors, which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 562-564, 1982.

MORRIS, G. P.; RAMU, P.; DESHPANDE, S. P.; HASH, C. T.; SHAH, T.; UPADHYAYA, H. D.; RIERA-LIZARAZU, O.; BROWN, P. J.; ACHARYA, C. B.; MITCHELL, S. E.; HARRIMAN, J.; GLAUBITZ, J. C.; BUCKLER, E. S.; KRESOVICH, S. Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. **Proceedings of the National Academic Sciences of the United States of America**, Washington, v. 110, n. 2, p. 453-458, 2013a.

MORRIS, G. P.; RHODES, D. H.; BRENTON, Z.; RAMU, P.; THAYIL, V. M.; DESHPANDE, S.; HASH, C. T.; ACHARYA, C.; MITCHELL, S. E.; BUCKLER, E. S.; YU, J.; KRESOVICH, S. Dissecting genome-wide association signals for loss-of-function phenotypes in sorghum flavonoid pigmentation traits. **G3**, Bethesda, v. 3, n. 11, p. 2085-2094, 2013b.

MYLES, S.; PEIFFER, J.; BROWN, P. J.; ERSOZ, E. S.; ZHANG, Z.; COSTICH, D. E.; BUCKLER, E. S. Association mapping: critical considerations shift from genotyping to experimental design. **Plant Cell**, Rockville, v. 21, n. 8, p. 2194-2202, 2009.

NORDBORG, M.; WEIGEL D. Next-generation genetics in plants. **Nature**, London, v. 456, p. 720-723, 2008.

NEGRI, B. F.; HUFNAGEL, B. M.; BERNARDINO, K. da C.; PASTINA, M. M.; MAGALHÃES, J. V.; SOUSA, S. M. de. **Caracterização morfológica do sistema radicular de linhagens endogâmicas recombinantes de sorgo sob baixo nível de fósforo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 23 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 98).

OLSEN, K. M.; WENDEL, J. F. Crop plants as models for understanding plant adaptation and diversification. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-16, 2013.

PLATT, A.; VILHJÁLMSSON, B. J.; NORDBORG, M. Conditions under which genome-wide association studies will be positively misleading. **Genetics**, Austin, v. 186, p. 1045-1052, 2010.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

SHARPLEY, A. N.; MCDOWELL, R. W.; KLEIMMAN, P. J. A. Phosphorus loss from land to water: integrating agriculture and environmental management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, p. 287-307, 2001.

SOUSA, S. M. de; CLARK, R.; MENDES, F.; OLIVEIRA, A. de; VASCONCELOS, M. J. de; PARENTONI, S. N.; KOCHIAN, L.; GUIMARÃES, C.; MAGALHÃES, J. A role for root morphology and related candidate genes in P acquisition efficiency in maize. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 39, p. 925-935, 2012.

TRACHSEL, S.; KAEPLER, S. M.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant and Soil**, The Hague, v. 341, p. 75-87, 2011.

UPADHYAYA, H. D.; PUNDIR, R. P. S.; DWIVEDI, S. L.; GOWDA, C. L. L.; REDDY, V. G.; SINGH, S. Developing a mini core collection of sorghum for diversified utilization of germplasm. **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 1769-1780, 2009.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

VANCE, C. P.; CHIOU, T. J. Phosphorus focus editorial. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 156, p. 987-988, 2011.

ZHU, J.; LYNCH, J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays* L.) seedlings. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 31, p. 949-958, 2004.

ZHU, J.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Mapping of QTLs for lateral root branching and length in maize (*Zea mays* L.) under differential phosphorus supply. **Theoretical and Applied Genetics**, Austin, v. 111, n. 4, p. 688-695, 2005a.

ZHU, J.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Mapping of QTL controlling root hair length in maize (*Zea mays* L.) under phosphorus deficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 270, p. 299-310, 2005b.



Milho e Sorgo

CGPE - 14313



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO

