

CIRO MAIA DE BRITO

**VARIABILIDADE GENÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA RADICAL
DE PLANTAS DE MILHO NA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO
DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento, para obtenção do título
de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

B862v
2009

Brito, Ciro Maia de, 1982-

Variabilidade genética e caracterização do sistema radical
de plantas de milho na eficiência de absorção e utilização de
Fósforo / Ciro Maia de Brito. – Viçosa, MG, 2009.
viii, 25f. : il. ; 29cm.

Orientador: Glauco Vieira Miranda.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 22-25.

1. Milho - Melhoramento genético. 2. *Zea Mays* L.
3. Milho - Efeito do fósforo. 4. Milho - Raízes.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 633.152

CIRO MAIA DE BRITO

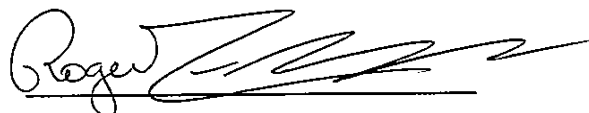
**VARIABILIDADE GENÉTICA E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA RADICAL
DE PLANTAS DE MILHO NA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO
DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento, para obtenção do título
de *Magister Scientiae*.

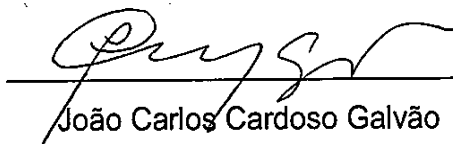
APROVADA: 16 de Outubro de 2009



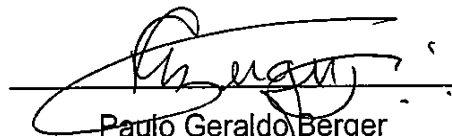
Cosme Damião Cruz
(Coorientador)



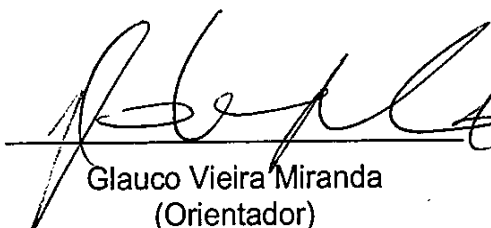
Rogério Faria Vieira
(Coorientador)



João Carlos Cardoso Galvão



Paulo Geraldo Berger



Glauco Vieira Miranda
(Orientador)

***"Em qualquer parte da Terra
Um homem estará sempre plantando,
recriando a vida.
Recomeçando o mundo"***

Cora Coralina

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas minhas conquistas e por iluminar meu caminho.

À Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Fitotecnia, Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Glauco Vieira Miranda, pelo enorme incentivo, confiança, desenvolvimento profissional e pela amizade durante toda a graduação e pós-graduação.

Ao pesquisador Rogério Faria Vieira, pelos ensinamentos e pelas sugestões na elaboração deste trabalho. Ao professor Cosme Damião Cruz, pelas orientações e sugestões. Ao pesquisador Paulo Cesar Magalhães (EMBRAPA Milho e Sorgo) pelo auxílio neste trabalho.

A toda minha família, meus pais Gilberto Barros de Brito e Marilda Aparecida Maia, ao meu tio Waldete de Carvalho Brito, pelo incentivo e pela enorme ajuda em minha vida. Aos meus irmãos Betinho, Lélis e Gabriel, grandes companheiros. A Alessandra Zandonadi, pelo amor, carinho e paciência durante todo este tempo.

Aos amigos do Programa Milho, Lauro, Aurélio, Clayton, Ronaldo, Lucimar, Leandro, Birigui, José Roberto de Bem pela amizade, aos parceiros Fernando e Mantovani, Marcelo, Joyce, Rodrigo, Éder, ao companheiro Júlio, Luciano, Luciana, Débora, Jardécio, Ítalo, Leandro, Paulo, Yuri (Butina), Roberto por todos os momentos compartilhados. A Maíra pela grande ajuda na Embrapa Milho e Sorgo. Ao Paulo Cesar da Fisiologia Vegetal/UFV pelas valiosas contribuições.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, Agronomia e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
MATERIAL E MÉTODOS.....	6
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
CONCLUSÕES.....	21
REFERÊNCIAS.....	22

RESUMO

BRITO, Ciro Maia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2009. **Variabilidade genética e caracterização do sistema radical de plantas de milho na eficiência de absorção e utilização de fósforo.** Orientador: Glauco Vieira Miranda. Coorientadores: Cosme Damião Cruz e Rogério Faria Vieira.

O fósforo é um nutriente limitante da produção agrícola nos solos tropicais, pelos baixos teores na forma disponível às plantas e pela baixa mobilidade. A arquitetura e a distribuição espacial do sistema radical podem aumentar a absorção de nutrientes pouco móveis no solo pela planta. Assim, o objetivo deste trabalho foi identificar o ideótipo do sistema radical para eficiência na absorção e utilização de fósforo; avaliar a eficiência de absorção e utilização de fósforo pelas plantas de linhagens de milho com diferentes morfologias do sistema radical, determinar a variabilidade genética das plantas de linhagens de milho para a concentração de raízes finas nos primeiros 10 cm do sistema radical e classificar linhagens de milho em eficientes e ineficientes pela análise multivariada. Foram avaliadas 22 linhagens de milho em alto e baixo P. O plantio foi realizado em vasos de PVC com quatro dm³. O substrato foi composto por areia (50%), vermiculita (37,5%) e solo (12,5%). O comprimento do sistema radical por classe de diâmetro foi avaliado utilizando o software WinRHIZO Pro 2007 acoplado a um scanner. As linhagens L20, L4, L16 e L9 em baixo P apresentaram crescimento acima de 10% em raízes muito finas em relação à mesma característica em alto P. A linhagem L20 produziu 91% a mais de raízes muito finas em baixo P. O aumento na produção de raízes muito finas em baixo P é o indicativo de resposta adaptativa ao estresse de P por plantas de milho. Linhagens que obtiveram valores acima da média para

CRMF10 apresentaram elevadas EUtP em baixo P e elevadas EAP em alto P. Entretanto em baixo P a EAP foi consistente para identificar linhagens com maiores comprimentos de raízes muito finas e finas. O mesmo não foi observado em alto P. O CRMF50 não foi consistente para discriminar as linhagens eficientes em absorver e/ou utilizar P, bem como para a PA/SR nos dois ambientes. Resultado semelhante foi obtido para o CRG10 e 50 também nos dois ambientes. Em baixo P, a linhagem L9 produziu mais raízes muito finas e finas na camada de 0-10 cm e as linhagens L8, L14 e L17 apresentaram maior produção na camada de 10-50 cm. Além de produzirem os maiores comprimentos de raízes grossas as linhagens L8 e L17 também produziram a maior quantidade de raízes finas de 0-10 cm. Foi observado que, nas camadas de 0-10 e 10-50 cm, as linhagens L2 e L22 respectivamente, produziram as menores quantidades de raízes em todos os diâmetros. A linhagem L19 e L11 apresentaram maior EAP em baixo P. Aumentando a disponibilidade de P a linhagem L19 manteve com maior EAP, entretanto a linhagem L11 foi inferior a média para essa característica em alto P. Indicando a grande estabilidade na EAP para a linhagem L19 e comportamento semelhante foi observado para a L8. Pela análise discriminante foi possível classificar as linhagens com base nos parâmetros radicais na camada de 0-10 cm e pela eficiência na absorção de P, em eficientes e ineficientes em baixo P. Concluiu-se que as eficiências de absorção e utilização de fósforo não são explicadas totalmente por uma única característica específica do sistema radical; é possível obter diferentes ideótipos radicais das plantas de milho, no entanto, esses podem não estar associados às maiores eficiências de absorção e utilização de fósforo; existe variabilidade entre as linhagens de milho para características de sistema radical em alto e baixo fósforo; e a análise multivariada por meio da função discriminante de Anderson é eficiente para avaliação simultânea do conjunto de características possibilitando a seleção de linhagens de milho mais promissora.

ABSTRACT

BRITO, Ciro Maia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2009. **Genetic variability and root system characterization of maize plants for phosphorus absorption and utilization efficiency.** Advisor: Glauco Vieira Miranda, Co-advisors: Cosme Damião Cruz and Rogério Faria Vieira.

Phosphorus is a nutrient that limits crop production in tropical soils because low levels in the form available to plants and limited mobility. The architecture and spatial distribution of the root system can increase the absorption of some nutrients with low mobility in the soil for the plant. The aim of this study was to identify ideotype the root system for phosphorus absorption and utilization efficiency by plants maize lines with different roots morphologies, the genetic variability of the maize lines for the concentration of fine roots in the first 10 cm of the root system and classify maize lines in efficient and inefficient for efficiencies. The 22 maize lines were evaluated of high and low P. The planting was done in PVC tubes, with four dm³. The substrate was composed of sand (50%), vermiculite (37.5%) and soil (12.5%). The root length and diameter were assessed using the software WinRhizo Pro 2007 connected to a scanner. The lines L20, L4, L16 and L9 in the low P showed root length 10% higher than in high P. The line L20 produced 91% more very fine roots length (VFRL) in low P than high P and is indicative of the adaptive response to the P stress by maize plants. The lines that showed high VFR10 presented high PUE in low P and high PAE in high P. However, in low P, the PAE was consistent to identify lines with high VFR and FR, but this was not observed in high P. The VFRL50 was not consistent for discriminating efficiency lines for phosphorus absorption or utilization and PA/SR in both environments. A similar result was obtained for thick root length (TRL10 and TRL50) in the two environments. In the low P, L9

lines produced more very fine root and fine root in the 0-10 cm layer and the lines L8, L14 and L17 showed increased production in the 10-50 cm layer. In addition to producing the highest thick root length, the lines L8 and L17 also produces the greatest amount of fine roots at 0-10 cm. It was noted that the 0-10 and 10-50 cm of the L2 and L22, respectively, produced the lowest number of roots in all diameters. For the discriminant analysis was possible to classify the lines in efficiency and non-efficiency based in the root traits and the P uptake efficiency in the low P. It was concluded that the phosphorus absorption and utilization efficiencies not fully explained by a single specific root trait; It can be obtained root ideotype of maize plants, but these can not be associated with the increased phosphorus absorption and use efficiency; there is the genetic variability among maize lines for traits of root systems in the high and low phosphorus and; multivariate analysis using Anderson discriminant function is effective for simultaneous evaluation of all evidence to the selection of maize most promising.

INTRODUÇÃO GERAL

Os solos tropicais caracterizam-se pelo elevado grau de intemperismo e pelos baixos teores de fósforo (P) na forma disponível para as plantas. O fósforo é um dos nutrientes mais limitantes à produção agrícola. Ele tem baixa mobilidade no solo e em geral concentra-se nos horizontes superficiais do solo (0-10 cm), especialmente no plantio direto.

O fósforo no solo pode ser encontrado em duas formas: P-orgânico (Po), que é o fósforo presente em compostos orgânicos e P-inorgânico (Pi), associado a compostos inorgânicos. O Po é encontrado na forma de fosfolipídios, ácidos nucleicos e fosfatos de inositol. O Po, expresso como porcentagem do P total, pode variar de 15 a 80%. Nas formas de fosfolipídios, as concentrações variam em torno de 5% do Po. Na forma de ácidos nucleicos pode atingir 2,5% do Po (Dechen e Nachtigall, 2007). Para ser utilizado pelas plantas, o Po deve ser primeiro mineralizado. O Pi encontra-se sob várias formas, as quais dependem do pH da solução do solo.

As plantas absorvem a maior parte do P como ânion monovalente-ortofosfato biácido H_2PO_4^- , e em menor proporção, como ânion bivalente-ortofosfato monoácido HPO_4^{2-} . O pH do solo influencia a proporção como essas duas formas de P estão disponíveis para absorção. O ânion monovalente H_2PO_4^- tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH abaixo de 7,0, enquanto o ânion divalente HPO_4^{2-} tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH acima de 7,0. As plantas podem utilizar outras formas de P que não os ortofosfatos, porém isso ocorre em menores proporções (Dechen e Nachtigall, 2007).

O P é importante na transferência de energia como parte do trifosfato de adenosina (ATP), como componente de muitas proteínas, coenzimas, ácido nucleico e substratos metabólicos. Além disso, o P promove a rápida formação e crescimento do sistema radical (Bennett, 1994; Taiz e Zeiger, 1998; Lopez-Bucio *et al.*, 2002; Dechen e Nachtigall, 2007). Além de sua importância na constituição de moléculas, a síntese de amido (nos cloroplastos) e sacarose (no citosol) e o transporte de carboidratos são influenciados pelo fósforo inorgânico (Fredeen *et al.*, 1989; Marschner, 1995).

O suprimento de nutrientes às plantas depende do seu conteúdo nos solos e do seu transporte até a superfície das raízes para serem absorvidos. Portanto, solos compactados, deficientes em água, poderão ser férteis e as plantas neles cultivadas apresentarem deficiência nutricional por falta de transporte dos nutrientes até as raízes. A chegada dos nutrientes às raízes não é necessariamente garantia de absorção plena. Existe variabilidade genética entre plantas de milho para absorção de nutrientes do solo, uma vez que há genótipos mais eficientes em absorver determinado nutriente que outros, para o mesmo suprimento no solo (Novais e Mello, 2007). A avaliação da eficiência de uma planta em absorver e utilizar o nutriente é importante nos processos de seleção de genótipos nutricionalmente mais eficientes em condições diversas de crescimento.

Um fator muito importante na absorção de nutrientes pela planta, principalmente na do P, ocorre quando plantas submetidas a estresse de P estimulam a secreção de H^+ pelas raízes e, assim, acidificam a rizosfera e aumentam a disponibilidade de P do solo. Esse processo é denominado aquisição (Clarkson, 1985; Marschner, 1995; Novais e Mello, 2007), já o termo absorção, refere-se ao transporte de nutrientes através de membranas celulares para o interior celular (Rocha, 2008).

Genes envolvidos em mecanismos de absorção e transporte de P em raízes de tomateiro expressão na camada epidérmica dos pêlos radicais (Daram *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 1998). A deficiência de P causa modificações nos processos bioquímicos no sistema radical, devido à múltipla ativação de genes (Raghothama e Karthikeyan, 2005). A identificação de QTL's para várias características do sistema radical foi feita por diversos autores (Hund *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2005; Beebe *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2006; Landi *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2008). Esse feito confirma a importância do estudo da ação gênica e sua influência no sistema radical e, conseqüentemente, na eficiência de absorção de nutrientes do solo.

Estudos com *Arabidopsis* permitira a identificação de nove genes presumíveis de transportadores de fosfato de alta afinidade, denominados de Pht1-1 a Pht1-9, da família Pht1 (Mudge *et al.*, 2002). Boa parte dos transportadores de alta afinidade, membros da família Pht1, são preferencialmente expressos na raiz, envolvidos na absorção de P do solo (Shin *et al.*, 2004).

O transporte de nutrientes até a superfície das raízes é decorrente da ação conjunta dos três mecanismos: interceptação radical, fluxo de massa e difusão (Barber, 1995). À medida que cresce no solo, o sistema radical encontra nutrientes que podem ser absorvidos. Essa interceptação radical, embora seja consequência apenas do crescimento das raízes, ela também, facilita, indiretamente, os mecanismos de transporte, principalmente da difusão, por diminuir a distâncias entre nutrientes e sistema radical, de maneira mais intensa na sua região apical de crescimento.

De acordo com Novais e Mello (2007), para os nutrientes P e Zn, que se encontram fortemente adsorvidos ao solo e, portanto, com baixo teor na solução, a difusão é o mecanismo de transporte responsável pela quase totalidade de sua absorção pelas raízes.

Existem vários mecanismos e processos na planta que contribuem para o uso eficiente de nutrientes, que variam em função do genótipo e do ambiente, tais como, sistema radical extensivo, explorando maior volume de solo; alta relação raízes/parte aérea; formação de raízes finas na camada superficial; arquitetura radical; colonização do sistema radical por microrganismos e características fisiológicas, como habilidade do sistema radical em modificar a rizosfera para aumentar a disponibilidade de nutrientes; capacidade de manter o metabolismo normal da planta e alta taxa fotossintética (Meurer, 2007).

A arquitetura radical é definida como a configuração espacial do sistema radical. Normalmente, os estudos de arquitetura de raiz não incluem muitos detalhes estruturais, tais como pêlos, mas estão direcionados com o sistema radical de forma geral ou com grande subconjunto do sistema radical (Lynch, 1995).

O sistema radical é uma estrutura complexa, tipicamente composta por centenas de eixos que variam com relação ao desenvolvimento, à fisiologia e à morfologia. A resposta da arquitetura radical à disponibilidade de P é extremamente específica em *Arabidopsis* (Lopez-Bucio *et al.*, 2002). A deficiência desse nutriente reduz o ângulo de crescimento das raízes basais de feijoeiro em relação à superfície do solo (Bonser *et al.*, 1996).

O progresso metodológico melhorou a visualização, quantificação e conceitualização da arquitetura radical e permitiu aferir sua relação com a produtividade. A arquitetura radical superficial é particularmente importante para a absorção de nutrientes pouco móveis no solo (Ge *et al.*, 2000). A

trajetória de crescimento das raízes está relacionada com as formas diferenciadas de arquitetura radical e pela disponibilidade de nutrientes no solo.

A maior concentração de raízes na camada superficial do solo possui vantagem em ambientes com baixa disponibilidade de P (Ge *et al.*, 2000), principalmente em ambientes com maior disponibilidade de P na camada superficial do solo, como nos solos tropicais. A trajetória de crescimento do sistema radical, gravitropismo, é possivelmente a característica controlada geneticamente (Oyanagi *et al.*, 1991). Liao *et al.* (2001) ao fazer análise de genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) observaram, diferenças na adaptação do sistema radical para a baixa disponibilidade de P. Sugeriram que os parâmetros da arquitetura radical estão relacionados com a eficiência na absorção de P. Esses parâmetros incluem ramificação das raízes laterais, densidade e comprimento de pelos radicais, raízes adventícias e plasticidade de crescimento do sistema radical. A disponibilidade de P na camada superficial do solo interfere no gravitropismo radical e genótipos eficientes na absorção e utilização de P apresentam o sistema radical superficial (Bonser *et al.*, 1996), ou seja, maior concentração de raízes na camada de 0-10 cm.

Variação genotípica de raízes laterais é o componente importante na eficiência de absorção de P em genótipos de milho (Zhu e Lynch, 2004). A arquitetura do sistema radical é importante na produtividade, pois os solos possuem gradiente de nutrientes e a distribuição espacial do sistema radical possibilita a maior habilidade da planta em absorver nutrientes (Lynch, 1995; Lynch e Brown, 2001; Dorlodot *et al.*, 2007; Hammer *et al.*, 2009). O sistema radical de plantas eficientes na absorção e utilização de P tem elevada plasticidade fenotípica na percepção e respostas às mudanças na disponibilidade de P no perfil do solo. Uma das respostas adaptativas das plantas é a alteração da arquitetura radical para aumentar a absorção de P do solo com custo mínimo de metabólitos (Lynch e Brown, 2001; Hammer *et al.*, 2009). O aproveitamento dos horizontes superficiais do solo, onde a disponibilidade do P é maior, pode ser aumentado pelo maior relação raízes finas/raízes grossas, menor ângulo de crescimento de raiz em relação à superfície do solo e maior formação de raízes laterais. Comparações de genótipos contrastantes em baixo P revelam que as plantas com melhor cobertura radical na camada superficial do solo têm maior aproveitamento de P (Liao *et al.*, 2001; Lynch e Brown, 2001; Nibau *et al.*, 2008). A adaptação

genotípica de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) ao baixo P está relacionada com a habilidade de alocar raízes na camada superficial do solo em condições de estresse de P (Liao *et al.*, 2001). Estudos com feijão, através de simulação de crescimento radical com o software SimRoot mostraram que em solos com distribuição uniforme de P, o sistema radical superficial explorou mais solo por unidade de massa seca de raiz que sistemas radicais profundos. Isso se deve ao fato que sistemas radicais superficiais se encontram mais disperso que os profundos, diminuindo a sobreposição e competição entre as raízes (Ge *et al.*, 2000).

Desde que a tolerância a estresses é uma característica complexa, compreendendo vários componentes, genótipos realmente superiores são aqueles que reúnem uma série de atributos favoráveis, que lhes confere superioridade na produção biológica e/ou econômica. Assim, eficiente ao baixo teor de P, não deve ser considerado apenas o genótipo com desempenho superior na produção de matéria seca total, mas também o que reúne outras características de importância. No aspecto nutricional, genótipos eficientes na absorção, na translocação de P para a parte aérea e na utilização do nutriente para a conversão em biomassa, também são desejados (Vance *et al.*, 2003; Raghothama e Karthikeyan, 2005). Desse modo, uma análise que leve em consideração diversos componentes importantes, simultaneamente, deve resultar em maior probabilidade de selecionar genótipos superiores. Quando o objetivo é a avaliação simultânea do conjunto de características, as técnicas de análise multivariada têm-se mostrado eficientes, por permitir combinar múltiplas informações contidas na unidade experimental, possibilitando a seleção de genótipos mais promissores com base no complexo de variáveis (Cruz *et al.*, 2004). O procedimento de análise proposto por Anderson (1958) permite alocar genótipos de comportamento desconhecido em grupos conhecidos.

Assim, os objetivos desta dissertação foram caracterizar o sistema radical de linhagens de milho em condições de alto e baixo P, nas camadas de 0-10 cm e de 10-50 cm; avaliar a eficiência na absorção e utilização de P de linhagens de milho com diferentes morfologias do sistema radical; determinar a variabilidade genética de linhagens de milho para a concentração de raízes muito finas na camada de 0-10 cm do sistema radical e classificar linhagens de milho em eficientes e ineficientes através de análise multivariada.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, MG, no Campo Experimental Diogo Alves de Mello, pertencente ao Departamento de Fitotecnia em casa de vegetação do Programa Milho[®] UFV. O período de cultivo foi em novembro e dezembro de 2008.

Foram utilizadas 22 linhagens de milho do Programa Milho[®], provenientes de grupos heteróticos distintos e obtidas na mesma safra agrícola. Foram instalados dois experimentos correspondendo a condições de alto e baixo P no delineamento de blocos casualizados com três repetições. A parcela constou de uma planta por vaso cilíndrico de PVC (10 cm de diâmetro por 50 cm de altura), com 4 dm³ de substrato.

As sementes das 22 linhagens foram esterilizadas por um minuto em solução 0,5% de hipoclorito, posteriormente foram lavadas duas vezes com água deionizada. Em cada repetição, foram usadas três sementes por linhagem, com tamanhos uniformes e colocadas em bandejas de germinação. Posteriormente, as sementes pré germinadas foram transferidas para o vaso de PVC.

O substrato foi formado pela mistura de 50% areia, 37,5% de vermiculita e 12,5% de solo. A utilização desse substrato foi importante para a avaliação do sistema radical, pela sua facilidade de remoção das raízes, boa estruturação e retenção de água. O solo foi utilizado para ocorrer adsorção do P, para não ficar prontamente disponível para a planta.

O solo utilizado apresentou as seguintes características químicas: pH em água = 4,7; P = 4,2 mg dm⁻³; P-rem = 24,3 mg L⁻¹; K = 76 mg dm⁻³; Zn = 6,4 mg dm⁻³; Fe = 62,7 mg dm⁻³; Mn = 69,7 mg dm⁻³; Cu = 1,4 mg dm⁻³; B = 0,5 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 1,7 cmolc dm⁻³; Mg²⁺ = 0,9 cmolc dm⁻³; Al³⁺ = 0,5 cmolc dm⁻³; H+Al = 6,27 cmolc dm⁻³; SB = 2,79 cmolc dm⁻³; CTC(t) = 3,29 cmolc dm⁻³; CTC(T) = 9,06 cmolc dm⁻³; V = 31%; m = 15%; MO = 2,7 dag kg⁻¹.

Realizou-se um ensaio preliminar para a definição das doses contrastantes de P. A curva de resposta à aplicação de P foi obtida, de acordo com Alvarez V. *et al.* (2000) usando as doses de 0; 20; 30; 41; 82; 104; 246; 410 mg dm⁻³ P. As doses contratantes foram aquelas que reduziram em 50% a

matéria seca da parte aérea. Portanto, utilizou-se 20 mg dm⁻³ de P, para baixo P, e 104 mg dm⁻³ de P para alto P.

O P foi aplicado no solo na forma de superfosfato triplo e posteriormente misturado em todo o substrato. No ambiente com baixo P misturaram-se 20 mg dm⁻³ de P na camada superficial de 0-10 cm e 10 mg dm⁻³ de P na camada de 10-50 cm. Conferindo assim o gradiente de disponibilidade de P, semelhante ao que ocorre em sistemas de plantio direto, onde o P está mais disponível na camada superficial. No ambiente com alto P, esse nutriente foi aplicado de forma uniforme em todo o vaso.

Os demais nutrientes foram adicionados via solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1938) modificada, sem adição de fósforo, para estudos de deficiência, de acordo com Passos (1996), contendo 1,0M Ca(NO₃)₂.4H₂O, 1,0M MgSO₄.7H₂O, 0,5M K₂SO₄, 0,32 mM CuSO₄.5H₂O, 46,0 mM H₃BO₃, 0,073 mM (NH₄)₆Mo₇O₂₄, 9,1 mM MnCl₂.4H₂O, 0,76 mM ZnSO₄.7H₂O e 38,0 mM Fe-EDTA. Aplicou-se a quantia de 75 ml dm⁻³ a cada dois dias. A irrigação foi realizada, com água deionizada, mantendo-se a umidade do substrato em torno de 80% da capacidade de campo.

As plantas foram colhidas no estágio vegetativo de quatro folhas completamente desenvolvidas, aproximadamente 25 dias após a emergência. No momento da colheita as folhas e caule foram separados do sistema radical. As raízes foram lavadas para serem separadas do substrato e cortadas de 0-10 cm a partir do coleto da planta. O sistema radical foi armazenado em frascos com álcool 25%, para posterior mensuração.

O sistema radical foi avaliado nas camadas de solo de 0-10 cm e 10-50 cm pela análise de imagens com o software WinRHIZO Pro 2007a (Régent. Instr. Inc.) acoplado ao scanner EpsonXL 1000 equipado com luz adicional (TPU). Foi utilizada a resolução de 400 dpi como descrito por Bauhus e Messier (1999); Bouma *et al.* (2000) e Costa *et al.* (2002). As raízes foram classificadas por diâmetro (d) como proposto por Bohn (1979) sendo raízes muito finas (d < 0,5mm), raízes finas (0,5 < d < 2,0 mm) e raízes grossas (d > 2,0mm).

Todas as características radicais identificadas pelo scanner foram avaliadas como comprimentos, volumes e superfície radiculares. No entanto, somente, devido a relação direta entre elas foram apresentadas nesse trabalho somente o comprimento de raiz muito fina (CRMF, cm), o comprimento de raiz

fina (CRF, cm), o comprimento de raiz grossa (CRG, cm) e o comprimento de raiz total (CRT, cm) nas camadas de 0-10 cm e 10-50 cm.

Após a determinação dos teores de P na matéria seca da parte aérea, estimaram-se os conteúdos de P total na parte aérea, permitindo desta forma calcular a eficiência de absorção de P ($EAP = P \text{ na planta} / P \text{ aplicado no solo}$) e a eficiência de utilização de P ($EUtP = \text{matéria seca parte aérea} / P \text{ na planta}$). Com os dados de matéria seca da parte aérea e do sistema radical foi calculado a razão entre parte aérea e sistema radical (PA/SR).

Foi calculado o índice de investimento em porcentagem, para as características de raiz como sendo $INV\% = [(m\acute{e}dia \text{ da caracter\'{i}stica em baixo P} / m\acute{e}dia \text{ da caracter\'{i}stica em alto P}) \times 100] - 100$. Esse índice indica o quanto o genótipo produziu em baixo P, a mais ou a menos, valores positivos e negativos respectivamente, em relação ao alto P.

Os genótipos foram classificados em baixo P pela análise multivariada, denominada função discriminante, descrita por Anderson (1958). A finalidade foi classificar genótipos de comportamento desconhecido em grupos conhecidos, fazendo-se uso simultâneo das características PA/SR, EAP, CRMF10, CRF10 e CRG10.

Sejam, π_1 e π_2 : populações 1 e 2, eficientes e ineficientes ao P, respectivamente; u_1 e u_2 : vetor de médias dos p caracteres avaliados na população π_1 e π_2 , respectivamente; Σ_1 , Σ_2 : matriz de covariância entre os caracteres avaliados na população π_1 e π_2 , respectivamente. Considerando que há homogeneidade das matrizes de covariância Σ_1 e Σ_2 , obtém-se a matriz Σ que é obtida a partir de Σ_1 e Σ_2 , levando-se em consideração is respectivos graus de liberdade; x : vetor de variáveis representativas dos caracteres envolvidos na análise. Nesse caso obtêm-se segundo Anderson (1958) as funções discriminantes:

$$D_e(x) = \ln(p_1) + (x - \frac{1}{2} u_1) \Sigma^{-1} u_1 \quad \text{e} \quad D_i(x) = \ln(p_2) + (x - \frac{1}{2} u_2) \Sigma^{-1} u_2$$

Em que, $D_e(x)$ e $D_i(x)$ são as funções discriminantes que possibilitam a obtenção de escores para a classificação dos genótipos nas populações π_1 e π_2 , consideradas eficientes e ineficientes ao P, respectivamente, e p_1 e p_2 são as probabilidades, "a priori", de os genótipos pertencerem às populações π_1 e π_2 respectivamente, considerados, iguais a 0,5, por não se ter informação prévia do comportamento do genótipo a ser classificado. Os genótipos foram classificados por repetição. Assim, classificou-se determinado genótipo como

eficiente em baixo P, se $D_e(x)$ foi maior que $D_i(x)$, e ineficiente, em caso contrário. A obtenção das estimativas de coeficiente de correlações simples foi realizada pelo método de Pearson.

As análises estatísticas e genéticas foram realizadas utilizando o Programa Genes - Aplicativo computacional em genética e estatística (Cruz, 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve homogeneidade das variâncias residuais entre baixo e alto P o que possibilitou a realização da análise de variância conjunta dos experimentos sem ajuste de graus de liberdade. Houve diferenças significativas entre os genótipos, as doses de P e para a interação G x P, para todas as características radicais nas duas camadas de solo, exceto entre os genótipos e a interação G x P para o comprimento de raízes grossas na camada de 10-50 cm (CRG50) (Tabela 1).

Tabela 1 - Resumo da análise de variância conjunta das características, CRMF (comprimento de raiz muito fina), CRF (comprimento de raiz fina), CRG (comprimento de raiz grossa) e CRT (comprimento de raiz total)

FV	GL	QM			
		CRMF10	CRF10	CRG10	CRT10
Genótipos - G	21	173008 **	9501 **	405 **	238536 **
Doses de fósforo - P	1	388003 **	96048 **	8303 **	1048456 **
G x P	21	78330 **	3194 **	205 **	101620 **
Genótipos/ Baixo P	(21)	135901 **	5007 **	64 **	162203 **
Genótipos/ Alto P	(21)	115438 **	7689 **	545 **	177953 **
Resíduo	84	5005	1468	16	8756
Média		684	232	24	940
CVe (%)		10	17	17	10
CVg/CVe		2,36	0,95	1,99	2,09
H ² Baixo		0,98	0,87	0,80	0,98
H ² Alto		0,93	0,70	0,96	0,92
		CRMF50	CRF50	CRG50	CRT50
Genótipos - G	21	2862838 **	152956 **	0,35 ns	3915597 **
Doses de fósforo - P	1	119765121 **	2765029 **	6,1 **	159787481 **
G x P	21	2160773 **	60998 **	0,17 ns	2652342 **
Genótipos/ Baixo P	(21)	665672 **	47993 **	0,08 **	978298 **
Genótipos/ Alto P	(21)	4357938 **	165961 **	0,44 **	5589641 **
Resíduo	84	196858	14793	0,1	254183
Média		2329	507	3,8	2840
CVe (%)		19	24	70	18
CVg/CVe		1,50	1,25	0,28	1,55
H ² Baixo		0,92	0,80	0,56	0,92
H ² Alto		0,92	0,88	0,61	0,92

^{ns} não significativo e ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

A existência de diferença significativa entre as médias nas doses de P para todas as características indica que as quantidades e a forma de aplicação do P foram adequadas para diferenciar os ambientes. As demais significâncias indicam a presença de variabilidade genética e o desempenho diferenciado das características radicais dos genótipos de acordo com a dose de fósforo.

Em baixo e alto P, todas as características radicais apresentaram o coeficiente de determinação genotípico (H^2) acima de 0,80, exceto o CRG50 que apresentou valor de 0,56 (Tabela 1). Quase todas as características radicais apresentaram valores para H^2 acima de 0,70. Apenas as características CRF10 e CRG50 apresentaram o CV_g/CV_e abaixo de um, indicando grande interferência do ambiente nessas características. Estimativas elevadas de H^2 indicam que a maior parte da variação entre as médias de genótipos é de natureza genética, enquanto valores superiores à unidade na relação CV_g/CV_e mostram que a variação genotípica supera a ambiental, sendo ambas as situações indicativas de possibilidade de sucesso na seleção de genótipos superiores. Estas estimativas ratificam a viabilidade das características radicais para discriminar os genótipos em baixo fósforo que quase sempre mostram baixos H^2 em campo.

As características PA/SR e EAP apresentaram diferenças significativas para todas as fontes de variação e apresentaram maior H^2 em alto P que em baixo P (Tabela 2). Não houve diferença significativa entre genótipos apenas em alto P para a EUtP. Para fósforo, Parentoni e Souza Júnior (2008) concluíram que a eficiência de aquisição foi suficiente para explicar a eficiência de uso desse nutriente e a eficiência de utilização de importância secundária em plantas adultas de milho. Para nitrogênio, avaliado em plantas adultas de milho, a eficiência de absorção do nutriente diferenciou genótipos em alta ou baixa disponibilidade e a eficiência de utilização não diferenciou genótipos (Souza *et al.*, 2008). Apenas para a PA/SR a relação CV_g/CV_e foi superior a unidade mostrando a possibilidade de utilizar essa característica para a seleção de genótipos superiores no uso de fósforo (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância conjunta das características PA/SR (relação entre parte aérea e sistema radical), EAP (Eficiência na absorção de fósforo) e EUP (Eficiência na utilização de fósforo)

FV	GL	QM		
		PA/SR	EAP	EUP
Genótipos - G	21	0,86 **	0,00006 **	26246 **
Doses de P - P	1	20,55 **	0,00166 **	19467434 **
G x P	21	0,54 **	0,00003 **	35169 **
Genótipos / Baixo P	(21)	0,12 **	0,00001 **	56886 **
Genótipos / Alto P	(21)	1,28 **	0,00008 **	4529 ns
Resíduo	84	0,07	0,00001	9930
Média		1,6	0,72	624
CVe (%)		17	0,44	16
CVg/CVe		1,40	0,89	0,52
H ² Baixo		0,76	0,82	0,72
H ² Alto		0,91	0,87	0,60

^{ns} não significativo e ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

Em baixo P, a média do CRT10 foi menor que o CRT50, devido à maior profundidade da camada de solo analisada (Tabela 3). A classificação das linhagens para o CRMF10 foi semelhante ao CRT10, com a correlação significativa de 0,98. A mesma estimativa da correlação foi encontrada para as características de CRMF50 e CRF50. Esses resultados mostraram a maior contribuição das raízes muito finas em relação às demais para a formação de todo o sistema radical e a importância daquela para a seleção de genótipos.

Ainda, em baixo P, nas duas camadas do solo, houve correlação significativa entre o CRF10 com as características CRMF50 de 0,64, CRF50 de 0,52 e com o CRT50 de 0,65. Em baixo P, a linhagem L9 produziu maior CRMF10 e CRF10 e as linhagens L8, L14 e L17 apresentaram maior CRMF50 e CRF50 (Tabela 3). Além de produzirem os maiores CRG as linhagens L8 e L17 também produziram o maior CRF10. Foi observado que nas camadas de 0-10 e 10-50 cm as linhagens L2 e L22 respectivamente, produziram as menores quantidades de raízes em todos os diâmetros. Esses resultados mostraram que foi possível identificar genótipos que possuem diferentes proporções de diâmetros de raízes em diferentes profundidades do solo. Assim, com as estimativas de H² será possível ter ganhos genéticos para essas características ou obter uma planta com ideótipo radicular que possui os maiores comprimentos de raízes finas nas duas profundidades de solo.

A linhagem L19 que produziu o maior CRMF10 também apresentou a maior PA/SR, produzindo grande quantidade de parte aérea e baixa produção de raízes de diâmetros maiores, o que possivelmente contribuiu para a maior EAP. A linhagem L8 obteve o maior valor na EUP, produzindo mais parte aérea por unidade de P na planta. Por sua vez, a linhagem L2 apesar de ser eficiente na utilização de P apresentou baixos comprimentos de raízes, EAP e PA/SR. Isso indica que a essa linhagem apresenta mecanismos fisiológicos específicos na utilização de P compensando a baixa capacidade de adquirir ou absorver fósforo do solo.

Houve correlação entre as variáveis EAP e EUP em baixo P de -0,45. Resultados semelhantes foram observados por Parentoni e Souza Junior (2008) com correlação negativa em alto P e baixa correlação em baixo P. Su *et al.* (2009) encontraram correlações negativas para essas duas características em trigo. Essa tendência de inversão de desempenho dos genótipos, na absorção e utilização de fósforo também foi encontrada para nitrogênio em plantas de milho (Souza *et al.*, 2008).

Em alto P, todas as características radicais apresentaram maiores estimativas do que em baixo P e também com estimativas de correlação semelhantes (Tabela 4). A média da EUP apresentou valores menores em alto P devido ao maior conteúdo de P na planta comparado com o baixo P, o que contribuiu para a redução dos valores, devido a razão entre matéria seca da parte aérea e conteúdo de P na planta.

O comportamento semelhante das linhagens na EUP em alto P indicam a possibilidade de outros mecanismos de utilização estarem relacionados com a resposta das linhagens e a menor importância dessa eficiência em alto P em relação ao baixo P (Tabela 4).

A linhagem L7 apresentou elevada EAP em alto P e valores intermediários para as características radicais, indicando a especificidade dessa linhagem em absorver P. As linhagens L19, L8 e L11 apresentaram maior EAP em baixo P. No entanto, em alto P, as linhagens L19 e L8 mantiveram-se com maiores EAP, entretanto a linhagem L11 apresentou-se abaixo da média ou entre as 50% inferiores, mostrando os bons desempenhos das linhagens L19 e L8 nas duas condições. No entanto, para utilizar como testemunhas em experimentos com doses contrastantes de fósforo, as linhagens ideais são aquelas com comportamentos contrastantes nas duas

condições como foram a L11 e a L7. Assim em alto P destacaram-se como controle positivo a L7 e como negativo a L11 e em baixo P, o controle positivo foi a L11 e como negativo foi a L7.

Em baixo P, as linhagens que obtiveram valores acima da média para CRMF10 apresentaram elevadas EUP como as linhagens L2, L8 e L20. Por sua vez, em alto P, as linhagens com maiores médias de CRMF10 apresentaram elevadas EAP como para as linhagens L19, L7, L8 e L10. Entretanto em baixo P, a EAP foi consistente para identificar linhagens com maiores comprimentos de raízes muito finas e finas. O mesmo não foi observado em alto P.

A CRMF50, CRG10 e CRG50 não foram consistentes para discriminar as linhagens eficientes em absorver e/ou utilizar P, bem como para a PA/SR em alto e baixo P. A maior EAP e EUP é atribuído a mecanismos adaptativos, como alterações na morfologia e arquitetura do sistema radical, em estresse, (Bonser *et al.*, 1996), quando esse mecanismo não se relacionam, outros estão envolvidos como capacidade de secretar ácidos orgânicos e mecanismo internos como atividade enzimática e transportadores de Pi (Raghothama e Karthikeyan, 2005).

Tabela 3 - Comparação entre as médias dos genótipos em baixo P, para as características PA/SR (relação entre matéria seca da parte aérea e sistema radical), EAP (Eficiência de absorção de fósforo), EUtP (Eficiência de utilização de fósforo), CRMF (comprimento de raiz muito fina, cm), CRF (comprimento de raiz fina, cm), CRG (comprimento de raiz grossa, cm), CRT (comprimento de raiz total, cm) nas duas camadas avaliadas 0-10 cm (10) e 10-50 cm (50).

Genótipos	PA/SR	EAP	EUtP	CRMF10	CRF10	CRG10	CRT10	CRMF50	CRF50	CRG50	CRT50
8	1,4 a	0,71365 b	1320 a	652 d	279 a	25,2 a	956 c	2079 a	575 a	1,77 b	2655 a
4	1,4 a	0,71048 c	1233 a	771 c	180 c	16,2 b	967 c	1016 c	258 c	1,24 b	1274 c
10	1,2 a	0,71222 b	1197 a	965 a	230 b	16,1 b	1211 a	1394 b	355 b	0,46 b	1748 b
20	0,9 b	0,71095 c	1137 a	848 b	173 c	14,5 b	1036 b	995 c	397 b	0,01 b	1391 c
2	1,0 b	0,70972 c	1080 a	251 h	149 c	7,8 c	408 g	578 d	191 c	0,34 b	769 d
18	1,1 b	0,71167 b	1079 a	933 a	223 b	19,5 a	1175 a	1751 a	406 b	0,01 b	2156 b
12	1,2 a	0,71292 b	1022 b	523 e	234 b	17,8 b	775 d	1711 a	368 b	4,49 a	2083 b
16	0,9 b	0,71042 c	1021 b	539 e	167 c	15,2 b	721 e	1121 c	268 c	1,17 b	1389 c
7	1,3 a	0,71214 b	1008 b	356 g	191 c	16,9 b	563 f	1545 b	468 a	0,61 b	2014 b
5	1,5 a	0,71201 b	1001 b	525 e	156 c	12,1 c	693 e	623 d	229 c	1,59 b	853 d
13	1,5 a	0,71241 b	1000 b	432 f	163 c	18,8 b	614 f	1168 c	258 c	0,36 b	1425 c
19	1,6 a	0,71573 a	988 b	988 a	191 c	18,2 b	1197 a	1316 c	373 b	0,41 b	1689 b
9	1,3 a	0,71261 b	985 b	973 a	248 a	14,4 b	1236 a	1610 b	187 c	0,16 b	1797 b
22	1,2 b	0,71101 c	979 b	474 f	205 b	20,1 a	699 e	326 d	196 c	0,01 b	521 d
15	1,1 b	0,71329 b	976 b	394 g	185 c	14,7 b	594 f	1615 b	585 a	1,13 b	2201 b
17	1,2 b	0,71293 b	975 b	511 e	270 a	21,3 a	802 d	2102 a	593 a	1,14 b	2696 a
6	1,0 b	0,71227 b	972 b	516 e	188 c	10,6 c	715 e	1705 a	414 b	0,01 b	2118 b
3	1,1 b	0,7103 c	948 b	513 e	133 c	5,1 c	651 e	1310 c	290 c	0,18 b	1599 b
21	1,0 b	0,71232 b	928 b	766 c	238 b	23,4 a	1028 b	1149 c	342 b	0,87 b	1491 c
14	1,0 b	0,71323 b	833 c	639 d	264 a	15,6 b	918 c	1730 a	530 a	0,57 b	2260 b
1	1,1 b	0,71351 b	822 c	694 d	210 b	16,1 b	920 c	1839 a	356 b	0,63 b	2195 b
11	1,3 a	0,71633 a	681 c	601 d	225 b	16,1 b	842 d	1595 b	336 b	1,55 b	1932 b
Média	1,2	0,71237	1008	630	205	16,2	851	1376	362	0,9	1739

Médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas, pertencem ao mesmo grupo estatístico, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Tabela 4 - Comparação entre as médias dos genótipos em alto P, para as características PA/SR (relação entre matéria seca da parte aérea e sistema radical), EAP (Eficiência de absorção de fósforo), EUtP (Eficiência de utilização de fósforo), CRMF (comprimento de raiz muito fina, cm), CRF (comprimento de raiz fina, cm), CRG (comprimento de raiz grossa, cm), CRT (comprimento de raiz total, cm) nas duas camadas avaliadas 0-10 cm (10) e 10-50 cm (50).

Genótipos	PA/SR	EAP	EUtP	CRMF10	CRF10	CRG10	CRT10	CRMF50	CRF50	CRG50	CRT50
19	3,0 a	0,72787 a	284 a	1171 a	352 a	48,3 b	1572 a	3481 b	713 b	4,2 b	4198 b
8	1,9 b	0,72758 a	205 a	913 b	310 a	56,7 a	1279 b	3945 b	824 b	2,5 b	4772 b
17	2,8 a	0,72721 a	270 a	855 b	351 a	45,3 b	1251 b	4158 b	1458 a	8,4 b	5624 b
7	2,6 b	0,72666 a	229 a	907 b	253 b	50,3 b	1210 b	3200 b	845 b	2,6 b	4047 b
5	3,1 a	0,72379 a	205 a	595 c	232 b	19,8 d	847 c	3274 b	540 c	2,3 b	3816 b
10	1,6 c	0,72347 a	180 a	945 b	251 b	30,6 c	1227 b	7264 a	898 b	7,5 b	8169 a
6	2,4 b	0,71991 b	260 a	718 c	194 b	17,6 d	929 c	3084 b	556 c	14,4 a	3654 b
14	1,5 c	0,71975 b	209 a	676 c	250 b	26,6 c	953 c	3714 b	718 b	10,9 b	4443 b
12	1,7 c	0,71974 b	237 a	607 c	229 b	25,5 c	862 c	3315 b	669 b	26,4 a	4010 b
18	1,6 c	0,71970 b	185 a	1081 a	288 a	34,1 c	1403 a	3732 b	690 b	0,4 b	4422 b
2	2,2 b	0,71928 b	207 a	619 c	235 b	25,2 c	879 c	2507 c	505 c	1,2 b	3013 c
4	1,9 b	0,71916 b	193 a	558 d	216 b	21,5 d	795 c	3503 b	615 b	4,7 b	4122 b
15	2,2 b	0,71914 b	291 a	527 d	243 b	31,7 c	801 c	2693 c	509 c	16,9 a	3219 c
9	2,3 b	0,71879 b	250 a	824 b	263 b	41,3 b	1129 b	3926 b	565 c	2,4 b	4494 b
11	1,4 c	0,71867 b	230 a	589 c	256 b	58,7 a	904 c	4167 b	746 b	4,5 b	4917 b
13	1,8 c	0,71859 b	249 a	827 b	307 a	44,5 b	1178 b	1880 d	428 c	26,3 a	2334 d
3	2,6 b	0,71756 b	214 a	635 c	203 b	17,8 d	856 c	2296 c	561 c	1,4 b	2859 c
1	2,4 b	0,71624 b	237 a	668 c	232 b	17,6 d	917 c	1353 d	331 c	0,7 b	1685 d
20	1,8 c	0,71269 c	297 a	445 d	175 b	17,2 d	637 d	3281 b	496 c	1,2 b	3778 b
21	1,0 d	0,71242 c	319 a	736 b	340 a	32,7 c	1109 b	3125 b	634 b	8,6 b	3767 b
22	0,7 d	0,71067 c	256 a	909 b	304 a	22,1 d	1235 b	3014 b	712 b	1,1 b	3727 b
16	0,9 d	0,70938 c	281 a	445 d	206 b	19,3 d	670 d	1277 d	329 c	0,9 b	1607 d
Média	2,0	0,71947	240	739	259	32	1029	3281	652	6,8	3940

Médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas, pertencem ao mesmo grupo estatístico, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Em baixo P, as linhagens L20, L4, L16 e L9 apresentaram o investimento no CRMF10 acima de 10% em relação à mesma característica em alto P, com destaque para a linhagem L20 com 91% a mais de raízes muito finas em baixo P (Tabela 5) o que expressou a resposta adaptativa em estresse (Liao *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2009). Na camada de 0-10 cm, em baixo P não houve investimento das linhagens em raízes grossas comparado com alto P, indicando a economia de carbono na formação destas raízes na camada superficial (Lynch e Ho, 2005).

Tabela 5 - Investimento de genótipos de milho em sistema radical nas camadas de 0-10 cm e de 10-50 cm

Genótipos	INV% (camada 0-10 cm)			INV% (camada 10-50 cm)		
	CRMF10	CRF10	CRG10	CRMF50	CRF50	CRG50
20	91	-1	-16	-70	-20	-99
4	38	-17	-25	-71	-58	-73
16	21	-19	-21	-12	-19	26
9	18	-6	-65	-59	-67	-93
1	4	-9	-9	36	8	-15
21	4	-30	-28	-63	-46	-90
10	2	-9	-47	-81	-60	-94
11	2	-12	-73	-62	-55	-66
14	-6	5	-42	-53	-26	-95
5	-12	-33	-39	-81	-58	-31
12	-14	2	-30	-48	-45	-83
18	-14	-23	-43	-53	-41	-97
19	-16	-46	-62	-62	-48	-90
3	-19	-35	-71	-43	-48	-87
15	-25	-24	-54	-40	15	-93
6	-28	-3	-40	-45	-26	-100
8	-29	-10	-56	-47	-30	-29
17	-40	-23	-53	-49	-59	-86
22	-48	-32	-9	-89	-72	-99
13	-48	-47	-58	-38	-40	-99
2	-59	-37	-69	-77	-62	-71
7	-61	-24	-66	-52	-45	-77

INV%=[(média baixo P/média alto P)x100]-100; CRMF (comprimento de raiz muito fina), CRF (comprimento de raiz fina) e CRG (comprimento de raiz grossa)

O investimento em raízes muito finas proporcionou a baixa razão PA/SR em baixo P, para as linhagens L20 e L16, indicando maior investimento em

sistema radical do que na maquinaria fotossintética como foi relatado por diversos autores com diferentes germoplasmas (Lynch e Brown, 2001; Lambers *et al.*, 2006; Hammer *et al.*, 2009). Entretanto, para as linhagens L4 e L9 ocorreu incremento em ambas nas características CRMF10 e PA/SR, mostrando o comportamento diferenciado das linhagens.

Na camada 10-50 cm, apenas as linhagens L1, L15 e L16 apresentaram investimento em CRMF50, CRF50 e CRG50, respectivamente (Tabela 5). Esse comportamento indicou a existência de variabilidade nas linhagens, para maior investimento em raízes muito finas na camada superficial do solo em detrimento a raízes de diâmetro maiores (Li *et al.*, 2007), contribuindo assim para melhor exploração dos nutrientes do solo na camada superficial como encontrado em solos sob plantio direto.

Várias adaptações do sistema radical ao estresse de P estão envolvidas em diferentes plantas (Nibau *et al.*, 2008). Em *Arabidopsis*, baixo P favorece a redistribuição do crescimento de raízes primárias para raízes laterais (Nibau *et al.*, 2008). As raízes primárias param de crescer e aumenta a densidade e alongação de raízes laterais formando o sistema radical superficial e altamente ramificado (Williamson *et al.*, 2001; Lopez-Bucio *et al.*, 2002; Nibau *et al.*, 2008). Em feijão (*Phaseolus vulgaris*), ocorre a diminuição na angulação da raiz em relação a superfície do solo em baixo P (Bonser *et al.*, 1996). As raízes proteóides (cluster) fixadoras de nitrogênio do tremoço branco (*Lupinus albus* L.) secretam ácidos orgânicos e fosfatase no solo para solubilizar o fosfato e auxiliar na absorção (Schulze *et al.*, 2006; Nibau *et al.*, 2008).

As técnicas de análise multivariada têm-se mostrado eficientes para avaliação simultânea do conjunto de características e por permitir combinar múltiplas informações contidas na unidade experimental possibilitando a seleção de genótipos mais promissores com base no conjunto de variáveis. Com base no comportamento eficiente e ineficiente, em baixo P, das linhagens L19 e L2, respectivamente, foram estimadas as funções discriminantes, dadas por: $De(x) = -1453,74 + 3414,63 \text{ PA/SR} - 151052 \text{ EAP} - 2,1251 \text{ CRMF10} + 2,0478 \text{ CRF10} + 55,912 \text{ CRG10}$ e $Di(x) = -1451,22 + 3413,08 \text{ PA/SR} - 150838 \text{ EAP} - 2,1296 \text{ CRMF10} + 2,0613 \text{ CRF10} + 55,778 \text{ CRG10}$.

Assim, classificou-se determinado genótipo como eficiente em baixo P, se $De(x)$ foi maior que $Di(x)$, e ineficiente, em caso contrário (Tabela 6). Não

se utilizou-se a EUP devido a falta de significância em todos os ambientes e falta de consistência para classificar as linhagens em relação a EAP e características radicais.

As linhagens L19 e L2 consideradas como padrões de eficiência e ineficiência com base nos parâmetros de eficiência de utilização e sistema radical realmente foram classificados como tal (Tabela 6). Portanto, as funções estimadas apresentaram consistência estatística e as inferências a respeito dos genótipos desconhecidos foram válidas (Oliveira *et al.*, 1999).

Tabela 6 - Classificação dos genótipos em baixo P de acordo com as respectivas estimativas das funções discriminantes, conforme o método de Anderson (1958)

Genótipo	Repetição	De(x)	Di(x)	Classe	Classificação
1	1	1730,665464	1730,131298	E	E/I
	2	520,173231	520,323392	I	E/I
	3	-246,988634	-245,537164	I	E/I
2	1	1516,508807	1518,174049	I	I
	2	1468,870115	1470,536744	I	I
	3	1359,127902	1360,796065	I	I
3	1	902,564694	902,511765	E	E/I
	2	452,579859	453,943996	I	E/I
	3	1758,101007	1758,583118	I	E/I
4	1	2279,802669	2278,233056	E	E
	2	2414,726388	2412,588875	E	E
	3	2267,279658	2265,297479	E	E
5	1	3386,651134	3386,011799	E	E/I
	2	2169,016611	2169,515183	I	E/I
	3	1391,966754	1391,753553	E	E/I
6	1	744,556039	745,218404	I	I
	2	893,815037	895,211345	I	I
	3	497,382457	499,287571	I	I
7	1	2829,936602	2830,901481	I	E/I
	2	2385,280045	2386,650108	I	E/I
	3	2077,753416	2077,70501	E	E/I
8	1	1872,55948	1872,493247	E	E
	2	3994,453646	3993,936718	E	E
	3	1744,292126	1743,994005	E	E
9	1	923,922795	922,632448	E	E/I
	2	2122,547772	2121,034805	E	E/I
	3	217,453313	217,760946	I	E/I

10	1	357,668493	357,142473	E	E
	2	1102,809786	1101,684026	E	E
	3	796,685781	794,84874	E	E
11	1	673,256185	675,235011	I	I
	2	1134,991799	1136,390476	I	I
	3	1068,387029	1069,639639	I	I
12	1	1530,733578	1531,141261	I	I
	2	1999,372201	2000,167396	I	I
	3	2042,815791	2043,978095	I	I
13	1	2986,658135	2986,121373	E	E/I
	2	2349,176853	2349,247435	I	E/I
	3	3084,50883	3083,861857	E	E/I
14	1	68,758726	71,921042	I	E/I
	2	1216,243806	1216,182082	E	E/I
	3	716,772504	717,978252	I	E/I
15	1	2321,82022	2322,141149	I	I
	2	486,446301	488,932489	I	I
	3	1475,110705	1476,53756	I	I
16	1	703,815819	704,377677	I	E/I
	2	986,791214	986,548906	E	E/I
	3	980,008904	979,47081	E	E/I
17	1	1842,986611	1844,461736	I	I
	2	2499,334761	2500,339269	I	I
	3	1823,859616	1824,126817	I	I
18	1	383,417252	381,660217	E	E
	2	975,577793	973,828053	E	E
	3	1242,392153	1241,024611	E	E
19	1	1464,570823	1462,904008	E	E
	2	1476,558449	1474,891333	E	E
	3	1415,953701	1414,287597	E	E
20	1	64,222936	63,306694	E	E
	2	412,177529	410,606469	E	E
	3	65,314975	64,317699	E	E
21	1	1075,696723	1075,850371	I	E/I
	2	1151,447239	1150,459853	E	E/I
	3	949,50798	947,758934	E	E/I
22	1	2367,146579	2366,795257	E	E/I
	2	1991,678683	1992,165829	I	E/I
	3	2400,321929	2399,678426	E	E/I

Classificação dos genótipos: E: Eficiente; I: Ineficiente; E/I: Comportamento inconsistente

CONCLUSÕES

Existe variabilidade entre as linhagens de milho para características de sistema radical em diferentes disponibilidades de fósforo.

O sistema radical das plantas de milho na camada de 0-10 cm é importante para a identificação de linhagens eficientes na absorção de fósforo.

O CRMF10 está associado com maior EUP em baixo P e maior EAP em alto P.

A maior EAP em baixo e alto P favorece uma maior produção de parte aérea.

O investimento das plantas de milho em raízes muito finas e diminuição de raízes grossas na camada de 0-10 cm do solo favorecem a maior adaptação do genótipo a ambientes com baixo P.

A análise multivariada por meio da função discriminante de Anderson foi eficiente para avaliação simultânea de um conjunto de características possibilitando a seleção de linhagens de milho mais promissoras com base no complexo de variáveis.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V. H. *et al.* Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo* [S.I.], v. 25, n. 1, 2000.
- ANDERSON, T. W. An introduction to multivariate statistical analysis. New York: John Wiley & Sons. 1958. 345 p.
- BARBER, S. A. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- BAUHUS, J.; MESSIER, C. Soil exploitation strategies of fine roots in different tree species of the southern boreal forest of eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* [S.I.], v. 29, n. 2, p. 260-273, Feb 1999.
- BEEBE, S. E. *et al.* Quantitative trait loci for root architecture traits correlated with phosphorus acquisition in common bean. *Crop Science* [S.I.], v. 46, n. 1, p. 413-423, Jan-Feb 2006.
- BENNETT, W. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. In: BENNETT, W. (Ed.). *Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants*. Sant Paul, Minnesota: APS Press, 1994. p. 1-7.
- BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. Berlim: Springer-Verlang. 1979
- BONSER, A. M. *et al.* Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist* [S.I.], v. 132, n. 2, p. 281-288, Feb 1996.
- BOUMA, T. J. *et al.* Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. *Plant and Soil* [S.I.], v. 218, n. 1-2, p. 185-196, 2000.
- CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* [S.I.], v. 36, p. 77-115, 1985.
- COSTA, C. *et al.* Root morphology of contrasting maize genotypes. *Agronomy Journal* [S.I.], v. 94, n. 1, p. 96-101, Jan-Feb 2002.
- CRUZ, C. D. *Programa Genes: Biometria*. Viçosa-MG: Editora UFV, 2006.
- CRUZ, C. D. *et al.* *Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético*. 3. ed.: Editora UFV, 2004.
- DARAM, P. *et al.* Functional analysis and cell-specific expression of a phosphate transporter from tomato. *Planta* [S.I.], v. 206, n. 2, p. 225-233, Oct 1998.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. *et al* (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFV, 2007. p. 91-132.

DORLODOT, S. *et al*. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science* [S.I.], v. 12, n. 10, p. 474-481, Oct 2007.

FREDEEN, A. L. *et al*. Influence of phosphorus-nutrition on growth and carbon partitioning in glycine-max. *Plant Physiology* [S.I.], v. 89, n. 1, p. 225-230, Jan 1989.

GE, Z. Y. *et al*. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. *Plant and Soil* [S.I.], v. 218, n. 1-2, p. 159-171, 2000.

HAMMER, G. L. *et al*. Can Changes in Canopy and/or Root System Architecture Explain Historical Maize Yield Trends in the US Corn Belt? *Crop Science* [S.I.], v. 49, n. 1, p. 299-312, Jan-Feb 2009.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. *The water culture method for growing plants without soil*. Berkeley, CA: California Agricultural Experiment Station, 1938. (347).

HUND, A. *et al*. QTL controlling root and shoot traits of maize seedlings under cold stress. *Theoretical and Applied Genetics* [S.I.], v. 109, n. 3, p. 618-629, Aug 2004.

LAMBERS, H. *et al*. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany* [S.I.], v. 98, n. 4, p. 693-713, Oct 2006.

LANDI, P. *et al*. Root-ABA1 QTL affects root lodging, grain yield, and other agronomic traits in maize grown under well-watered and water-stressed conditions. Oxford Univ Press, 2007. p.319-326.

LI, J. *et al*. Root and shoot traits responses to phosphorus deficiency and QTL analysis at seedling stage using introgression lines of rice. *J. Genet. Genomics*, v.36, p.173-183. 2009.

LI, K. P. *et al*. Efficient production and characterization for maize inbred lines with low-phosphorus tolerance. *Plant Science* [S.I.], v. 172, n. 2, p. 255-264, Feb 2007.

LIAO, H. *et al*. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant and Soil* [S.I.], v. 232, n. 1-2, p. 69-79, 2001.

LIU, C. M. *et al.* Tomato phosphate transporter genes are differentially regulated in plant tissues by phosphorus. *Plant Physiology* [S.I.], v. 116, n. 1, p. 91-99, Jan 1998.

LIU, J. C. *et al.* Mapping QTLs for root traits under different nitrate levels at the seedling stage in maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* [S.I.], v. 305, n. 1-2, p. 253-265, Apr 2008.

LOPEZ-BUCIO, J. *et al.* Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. *Plant Physiology* [S.I.], v. 129, n. 1, p. 244-256, May 2002.

LYNCH, J. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology* [S.I.], v. 109, n. 1, p. 7-13, Sep 1995.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging - an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant and Soil* [S.I.], v. 237, n. 2, p. 225-237, Dec 2001.

LYNCH, J. P.; HO, M. D. Rhizoeconomics: Carbon costs of phosphorus acquisition. Springer, 2005. p.45-56.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 2. ed. London: Academic Press, 1995.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F. *et al* (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 65-90.

MUDGE, S. R. *et al.* Expression analysis suggests novel roles for members of the Pht1 family of phosphate transporters in Arabidopsis. *Plant Journal* [S.I.], v. 31, n. 3, p. 341-353, Aug 2002.

NIBAU, C. *et al.* Branching out in new directions: the control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist* [S.I.], v. 179, n. 3, p. 595-614, 2008.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. *et al* (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFV, 2007. p. 133-204.

OLIVEIRA, V. R. *et al.* Tolerância de genótipos de pimentão ao baixo teor de fósforo no solo. *Bragantia*, v.58, n.1, p.125-139. 1999.

OYANAGI, A. *et al.* VARIETAL DIFFERENCES IN GEOTROPIC RESPONSE OF PRIMARY SEMINAL ROOT IN JAPANESE WHEAT. *Japanese Journal of Crop Science* [S.I.], v. 60, n. 2, p. 312-319, Jun 1991.

PARENTONI, S. N.; SOUZA, C. L. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [S.I.], v. 43, n. 7, p. 893-901, Jul 2008.

PASSOS, L. P. *Métodos analíticos e laboratoriais em fisiologia vegetal*. Coronel Pacheco: EMBRAPA, 1996.

RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. *Plant and Soil* [S.I.], v. 274, n. 1-2, p. 37-49, Jul 2005.

ROCHA, M. C. *Caracterização morfofisiológica radical relacionada aos mecanismos de aquisição de fósforo em sorgo*. (2008). 52 f. (Mestrado) - Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SCHULZE, J. *et al.* Nitrogen fixation by white lupin under phosphorus deficiency. *Annals of Botany* [S.I.], v. 98, n. 4, p. 731-740, Oct 2006.

SHIN, H. *et al.* Phosphate transport in Arabidopsis: Pht1;1 and Pht1;4 play a major role in phosphate acquisition from both low- and high-phosphate environments. *Plant Journal* [S.I.], v. 39, n. 4, p. 629-642, Aug 2004.

SOUZA, L. V. *et al.* Genetic control of grain yield and nitrogen use efficiency in tropical maize. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.11, Nov, p.1517-1523. 2008.

SU, J. Y. *et al.* Detection of QTLs for phosphorus use efficiency in relation to agronomic performance of wheat grown under phosphorus sufficient and limited conditions. *Plant Science* [S.I.], v. 176, n. 6, p. 824-836, Jun 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant Physiology*. 2. ed. Massachusetts, USA: Sinauer Associates, Inc., Publishers Sunderland, 1998.

VANCE, C. P. *et al.* Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* [S.I.], v. 157, n. 3, p. 423-447, Mar 2003.

WILLIAMSON, L. C. *et al.* Phosphate availability regulates root system architecture in Arabidopsis. *Plant Physiology* [S.I.], v. 126, n. 2, p. 875-882, Jun 2001.

ZHU, J. M. *et al.* Mapping of QTLs for lateral root branching and length in maize (*Zea mays* L.) under differential phosphorus supply. *Theoretical and Applied Genetics* [S.I.], v. 111, n. 4, p. 688-695, Aug 2005.

ZHU, J. M.; LYNCH, J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*) seedlings. *Functional Plant Biology* [S.I.], v. 31, n. 10, p. 949-958, 2004.

ZHU, J. M. *et al.* Detection of quantitative trait loci for seminal root traits in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown under differential phosphorus levels. *Theoretical and Applied Genetics* [S.I.], v. 113, n. 1, p. 1-10, Jun 2006.