



FABRICIO RODRIGUES

**FENOTIPAGEM E SELEÇÃO DE LINHAGENS
DE SORGO QUANTO À EFICIÊNCIA E
RESPOSTA AO FÓSFORO**

LAVRAS – MG

2010

FABRICIO RODRIGUES

**FENOTIPAGEM E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SORGO QUANTO
À EFICIÊNCIA E RESPOSTA AO FÓSFORO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador
Dr. César Augusto Brasil Pereira Pinto

LAVRAS – MG

2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Rodrigues, Fabrício.

Fenotipagem e seleção de linhagens de sorgo quanto à eficiência e resposta ao fósforo / Fabrício Rodrigues. – Lavras : UFLA, 2010.
95 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.
Orientador: César Augusto Brasil Pereira Pinto.
Bibliografia.

1. Eficiência nutricional. 2. Análise de trilha. 3. Índice de seleção. 4. Correlação fenotípica. 5. Parâmetros genéticos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.6223

FABRICIO RODRIGUES

**FENOTIPAGEM E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SORGO QUANTO
À EFICIÊNCIA E RESPOSTA AO FÓSFORO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de setembro de 2010.

Dr. Carlos Alberto Silva	UFLA
Dr. Flávio Dessaune Tardin	EMBRAPA
Dr. João Bosco dos Santos	UFLA
Dr. Robert Eugene Schaffert	EMBRAPA

Dr. César Augusto Brasil Pereira Pinto
Orientador

LAVRAS – MG

2010

A Deus,

Aos meus pais, Ademir Nazaré Rodrigues e

Maria José da Conceição Vitoriano Rodrigues;

Aos meus irmãos, Fabiano, Laira e Anderson;

A minha esposa Jeanne e demais familiares;

Aos meus amigos da Embrapa e UFLA

A todos que ajudaram na construção deste trabalho,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força, paz e tranqüilidade nos momentos de superação.

Aos meus pais e irmãos, pelo imenso apoio e por acreditarem comigo em meus sonhos.

A minha esposa, Jeanne, pelo seu carinho, amor, paciência, incentivo e, principalmente, pela sua cumplicidade.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

À Embrapa Milho e Sorgo, especialmente ao pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert, pelo incentivo, ensinamentos, disponibilidade, amizade e paciência durante a condução dos trabalhos.

Ao professor Dr. César Brasil por orientar, pelos ensinamentos, sugestões e disponibilidade para me atender quando as dúvidas surgiram.

Aos pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo, Flávio, Rafael, Álvaro, Lauro, Sidney, Cláudia e Jurandir pelas importantes contribuições dadas, durante a execução deste trabalho.

A banca examinadora deste trabalho, Prof. Dr. João Bosco dos Santos e Carlos Alberto Silva.

Aos professores do curso de Genética e Melhoramento de Plantas pelos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos da batata, Guiga, Ramon, Isabel, Isabela, Cleiton, Jéssica.

A equipe da Embrapa Milho e Sorgo, Geraldo Magela, Edimar, Eidinilson, Alex, Marcos André, Geraldo Maria, Adilson, Leandro, Luciano, Tarcisio, Heraldo, Gislene, Francine, Juliana, Heliete e Roseane, pela imensa colaboração neste trabalho.

A Fundação McKnight e Generation Challenge Program, pelo apoio financeiro na execução do trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Biologia, Irondina, Zélia, Rafaela e Heloisa.

A todos os amigos do GEN e da ex-república.

À querida família Vitoriano e Rodrigues.

Enfim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

RESUMO

A deficiência de fósforo é um dos principais fatores limitantes à expansão agrícola do sorgo em solos de cerrado, aliado a esse fato, o aumento no preço dos adubos fosfatos e a sua futura escassez remetem a utilização de cultivares mais eficientes e responsivas ao fósforo. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estimar correlações fenotípicas, desdobrá-las em efeitos diretos e indiretos relacionados à eficiência e resposta ao fósforo, selecionar linhagens com melhor desempenho sob condições de estresse nutricional e em ambientes adubados e avaliar a produtividade como medida de classificação das linhagens de sorgo. Os experimentos foram realizados na área de fenotipagem de fósforo na Embrapa Milho e Sorgo nas safras 08/09 e 09/10, em dois níveis de fósforo, 30 e 6 mg dm⁻³, controle e estresse, respectivamente. Foram avaliadas 20 linhagens de sorgo recombinantes e contrastantes na eficiência e resposta ao fósforo e mais 10 testemunhas (experimento 1) e 36 linhagens elites de sorgo (experimento 2), analisadas em blocos ao acaso em esquema fatorial simples. As características avaliadas foram massa fresca parte aérea (MFPA), massa seca parte aérea (MSPA), teor de fósforo nos grãos (TFG), teor de fósforo na planta (TFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), diferença de produtividade (DFPROD), produtividade relativa (PREL), eficiência fisiológica (EFISIO), eficiência de recuperação aparente (EFREC) e eficiência agrônômica (EFAGRO). O caráter mais indicado para a avaliação da eficiência de linhagens de sorgo ao fósforo foi ICF para EFUTIL e MSG para EFA e EFUSO, sob condições de estresse. O caráter mais indicado para a avaliação da resposta ao fósforo, em linhagens de sorgo, foi o caráter MSG para EFREC, EFISIO e EFAGRO, sob condições adequadas de adubação. As linhagens com maior efeito responsivo são P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E e SC566 e as mais eficientes sob condições de estresse de fósforo são as linhagens ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 e BR012 (2B). As linhagens SC566, ATF40B, BR007B, BR008B e P9401 foram as que apresentaram melhor desempenho de forma simultânea para diferentes características de eficiência e resposta ao P. A classificação com base na produtividade é um excelente método de identificação de linhagens em eficientes e responsivas.

Palavras-chave: Eficiência nutricional. Análise de trilha. Índice de seleção. Correlação fenotípica. Parâmetros genéticos.

ABSTRACT

Phosphorus deficiency is a major factor limiting the expansion of agriculture of sorghum in cerrado soil, combined with this fact, the increase in the price of phosphate fertilizers and their future shortages refer to use cultivars more efficient and responsive to phosphorus (P). The present study was the objective to estimate phenotypic correlations, estimate direct and indirect effects related to the efficiency and responsiveness to P, select traits with improved performance under conditions of nutritional stress and fertilized environments and evaluate the productivity as a measure of classification of sorghum lines. The experiments were conducted in the area of phenotyping of phosphorus phenotyping site at Embrapa Maize and Sorghum crops in 08/09 and 09/10, with two levels of phosphorus, 30 and 6 mg dm⁻³, control and stress, respectively. Twenty sorghum Recombinant Inbred Lines (RILs) contrasting for efficiency and response to phosphorus and 10 control lines (experiment 1) and 36 elite sorghum lines (Experiment 2), analyzed in randomized blocks within P levels. The traits evaluated were shoot fresh weight (MFPA), shoot dry matter (MSPA), phosphorus content in the grains (TFG), phosphorus content in the plant (TFPA), phosphorus harvest index (IFC), the quotient of utilization (QUTIL), dry weight of grains (MSG), efficiency of absorption (EFA), utilization efficiency (EFUTIL) use efficiency (effusive), difference in productivity (DFPROD), relative productivity (PREL), physiological efficiency (Efisio), apparent recovery efficiency (EFREC) and agronomic efficiency (EFAGRO). The trait most suitable for evaluating the efficiency of sorghum lines was ICF for EFUTIL and MSG for EFA and EFUSO, under stress conditions. The trait most suitable for evaluating the response to phosphorus in sorghum lines, was MSG for EFREC, EFISIO and EFAGRO, under P conditions of fertilization. The sorghum lines with high responsive effect are P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E and SC566 and major efficient under conditions of stress of phosphorus are the lines ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 and BR012 (2B). The lines SC566, ATF40B, BR007B, BR008B and P9401 showed the best performance simultaneously for different traits of efficiency and response to P. The classification based on productivity is an excellent method of identifying lines in efficient and responsive.

Keywords: Nutritional Efficiency. Path analysis. Selection index. Phenotypic correlation. Genetic parameters.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO GERAL	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
	REFERÊNCIAS	32
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	32
	ARTIGO 1 Critérios para a seleção de linhagens de sorgo eficientes e responsivas ao fósforo	42
1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAL E MÉTODOS	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	60
	ARTIGO 2 Seleção de linhagens de sorgo eficientes e responsivas à aplicação de fósforo	66
1	INTRODUÇÃO	69
2	MATERIAL E MÉTODOS	71
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	93

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da economia mundial nos anos recentes tem ocasionado uma demanda crescente de carne, e conseqüentemente tem elevado o consumo de ração animal. Aliado a esse fato, a demanda de grãos para produção de biocombustíveis são fatores que estão alterando o cenário global da produção e consumo de grãos no mercado mundial, inclusive o do sorgo (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). Entretanto, o cultivo de sorgo granífero fica mais restrito as áreas do cerrado, na qual apresentam baixa fertilidade, elevada acidez e baixos teores de fósforo.

O fósforo, de acordo com Holford (1997), é o segundo nutriente essencial que mais limita à produção agrícola, depois do nitrogênio. Nos solos tropicais, a “construção” da fertilidade do solo em fósforo torna-se particularmente importante, uma vez que esses solos apresentam baixa disponibilidade natural e alta capacidade de adsorção e de fixação desse nutriente. Somado a esses fatos, a aquisição, assimilação e translocação de nitrogênio nas plantas podem ser restringidas pela deficiência de fósforo (GNIAZDOWSKA et al., 1999). Essas considerações evidenciam que a adubação fosfatada é imprescindível à implantação e manutenção do sorgo; no entanto, requer-se o estabelecimento de critérios mais exatos para sua recomendação, visando a uma maior eficiência econômica. Assim, tem-se intensificado a busca para o melhor aproveitamento do potencial adaptativo de genótipos às condições adversas de fertilidade do solo, por meio do melhoramento genético, ou seja, cultivares que apresentam maior eficiência nutricional.

A eficiência é definida como a capacidade de determinado genótipo em adquirir o nutriente para incorporá-lo e utilizá-lo na produção de biomassa ou material vegetal de rendimento econômico (BLAIR, 1993), como os grãos, no caso específico dos cereais.

Os critérios ou definições de eficiência são vários e, geralmente, dividem-se entre os que enfatizam a produtividade e aqueles que enfatizam o requerimento interno do nutriente na planta (GOURLEY; ALLAN; RUSSELLE, 1994), dependentes das características morfológicas, bioquímicas e fisiológicas dos vegetais.

Como a escassez de informações a esse respeito para a cultura do sorgo, objetivou-se, no presente trabalho, estimar correlações fenotípicas e desdobrá-las em efeitos diretos e indiretos relacionados à eficiência e resposta ao fósforo com o intuito de selecionar as características mais eficientes em discriminar as linhagens e selecionar linhagens com melhor desempenho sob condições de estresse nutricional e em ambientes adubados e para ambos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A importância econômica do sorgo no Brasil e no mundo

O sorgo é uma gramínea de origem africana, de nome científico *Sorghum bicolor*. Durante o processo natural de evolução, as plantas de sorgo desenvolveram mecanismos de adaptação para uma gama de condições ambientais, resultando em uma extensa variação genética para tolerância a diversos estresses (TUINSTRA et al., 1997). Geralmente apresenta preços inferiores ao milho, porém seu cultivo é mais vantajoso em regiões de solos arenosos e clima seco, onde apresenta melhor rendimento por unidade de área.

Em regiões como a Ásia, África e América Central os grãos de sorgo são largamente utilizados para a alimentação humana, enquanto que na América do Norte e Sul, Europa e Austrália sua produção é destinada especialmente à produção de rações (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2009). A área colhida com sorgo no mundo aumentou somente 4% durante as safras 2000/01 e 2009/10, porém, a produção teve um aumento de 14% durante esse período. Indicando que houve um aumento no nível tecnológico e utilização de sementes de melhor qualidade pelos produtores (CONAB, 2010).

No Brasil, durante os anos de 1975 a 2008, houve uma variação considerável em termos de número total de municípios brasileiros com plantio de sorgo granífero, área total plantada com sorgo, produção e rendimento médio anual. Principalmente entre 1975 e 2004 foi observada uma expansão crescente em termos de área plantada com sorgo no Brasil, considerando que em 1975 foram plantados 8,5 mil hectares e, em 2004, a área plantada chegava a 93,5 mil ha. Nesse mesmo período, a produção passou de quase 200 mil toneladas para praticamente 2,15 milhões de toneladas. A partir de 2000, o rendimento médio

anual se manteve acima dos 2000 kg ha⁻¹. A partir de 2004 ocorreu uma diminuição em torno de 25% da área plantada e também da quantidade produzida (LANDAU; MENDES; LONGO, 2008).

A produção brasileira de sorgo deverá atingir 1,84 milhão de tonelada na safra 09/10, sendo o volume inferior em 4,6% diante dos quase dois milhões (1,93 milhão) de tonelada colhidos na safra 08/09. A área a ser cultivada em 09/10 deve ficar em 781 mil hectares, ante os 846 mil hectares registrados na safra 2008/09, com recuo de 7,7% (CONAB, 2010).

A produtividade média do país, prevista para a safra 2009/10, é de 2.348 kg ha⁻¹, sendo 2,7% superior a safra 2008/09. O Centro-Oeste deve seguir como a maior região produtora de sorgo no País, com área cultivada prevista de 453 mil hectares, com retração de 12,4% com relação à safra passada (CONAB, 2010).

O Sul do Brasil detém a maior produtividade média (2634 kg ha⁻¹), e o estado com a maior produtividade é o Paraná, com 3546 kg ha⁻¹. A área plantada e a produção na região Sul, no entanto, são pequenas em relação ao restante do país. A produção de sorgo continua concentrada no Centro-Oeste brasileiro, onde são plantados cerca de 60% da produção nacional (CONAB, 2010).

Para o Nordeste, o sorgo surge como uma cultura alternativa, que oferece menor risco e possibilidade de produção de alimentos onde as condições de solo e escassez de água limitam a produção da maioria das gramíneas (MENDES, 1986). Segundo Menelau (1998), existe uma área potencial para a exploração com o sorgo no Nordeste de 9,4 milhões de hectares. Nos últimos 10 anos a área de exploração no Nordeste saltou de 24 mil hectares na safra de 1998 para 106 mil em 2008 (CONAB, 2010).

Foram observados, no ano de 2003, aumentos significativos da área plantada e da produção de sorgo nas Regiões Sudeste e Nordeste, as quais também superaram a área destinada à cultura na Região Sul. Na Região Sudeste,

o maior aumento foi observado no Noroeste de Minas Gerais, como no município de Unaí, e também em municípios situados próximos ao limite sudoeste entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, como Conceição das Alagoas (MG), Miguelópolis (SP) e Guairá (SP) (LANDAU; MENDES; LONGO, 2008).

A produção de sorgo granífero em Minas Gerais ainda é incipiente em comparação com outros estados produtores, mas o desenvolvimento da cultura está em andamento, com foco na região Norte do Estado e triângulo mineiro. A produção no Norte é beneficiada pelo clima seco e os resultados de aumento da produção começaram a aparecer, já que a área plantada da safra 06/07 de sorgo granífero foi estimada em 10 mil hectares, frente aos sete mil hectares da safra 05/06, sendo a produtividade média por hectare foi de 2, 235 kg ha⁻¹ (CONAB, 2010).

2.2 Fósforo

O fósforo é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É também componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. As limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. O suprimento adequado de P é, pois, essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT, 2001).

A planta em crescimento pode apresentar diferentes estádios na nutrição mineral, tendo em conta o balanço entre os suprimentos interno e externo de nutrientes e a demanda da planta por nutrientes. Inicialmente, as plantas vivem

de suas reservas na semente, e o suprimento externo tem pouco efeito no crescimento. Uma segunda etapa ocorre quando a taxa de crescimento é determinada pelo suprimento de nutrientes através de um balanço dinâmico entre fatores internos da planta e o fósforo no solo (GRANT, 2001).

As diferentes formas de P no solo são agrupadas em três frações: o fósforo em solução, o fósforo lábil e o não-lábil. O teor de P na solução é geralmente baixo (menor que $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$, predominante na forma de H_2PO_4^- nos solos da região do cerrado) e representa muito pouco para as necessidades dos vegetais, estando em equilíbrio rápido com as formas lábeis da fase sólida (RESENDE, 2004; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003). Esse equilíbrio dá-se por meio da dessorção e dissolução do fosfato lábil, repondo constantemente, se houver disponibilidade, o fósforo absorvido da solução pelas plantas. O P não-lábil, a maior proporção do P inorgânico do solo, apenas muito lentamente pode voltar a formas lábeis. Portanto, o que se procura determinar na análise de solo, pra fins de adubação, é o somatório do P-solução e P-lábil (P disponível). A fração de P precipitado com Fe, Al e Ca, mais aquela adsorvida em óxidos de Fe e Al, representa a P-lábil, enquanto o P não-lábil corresponderia aos compostos fosfatados mais complexos e estáveis (GOEDERT; SOUZA; LOBATO, 1986; RAIJ, 1991).

Os fertilizantes liberam o P para a solução do solo, e em seguida, para a fase sólida, convertendo-se inicialmente em fósforo lábil e, com o tempo, passando a formas não-lábeis, as quais não seriam passíveis de aproveitamento imediato pelas plantas (P não-disponível). O fósforo pode ser removido da solução via adsorção por ligações covalentes de alta energia com a superfície de argilas e óxidos de ferro e de alumínio em solos ácidos ou, ainda, com carbonatos de cálcio (Ca), em solos calcários. O nutriente pode fazer parte de compostos orgânicos. O P orgânico ocorre em teores proporcionais ao conteúdo de matéria orgânica do solo (RESENDE, 2004). Em geral, quanto maior a

acidez, o teor de argila e, principalmente, quanto maior a presença de óxidos de Fe e Al na fração argila, mais intenso é o processo de fixação de P nos solos dos trópicos (LOPES, 1983; MALAVOLTA; PONCHIO, 1987; NOVAIS; SMYTH, 1999).

A aplicação de P em doses elevadas em solos intemperizados é justificada pela intensa fixação desse elemento, ocasionando baixo conteúdo de P disponível, principalmente em solos onde há predomínio de minerais de Fe e Al (NOVAIS; SMYTH, 1999). Porém, acarreta um aumento significativo no custo final da produção. A eficiência agrônômica dos adubos fosfatados pode ser afetada pelas fontes de fosfato, propriedades do solo, modos de aplicação e, também, pelas espécies vegetais (CHIEN; MENON, 1995).

2.2.1 Disponibilidade de fósforo em solos tropicais

As principais razões para a baixa disponibilidade de P nos solos tropicais são os baixos conteúdos deste nutriente e a alta capacidade de fixação do mesmo pelo solo, principalmente em formas hidratadas amorfas de óxido de ferro (hematita), de alumínio (gibbsite) e em argila tipo caulinita (BALIGAR; FAGERIA, 1997).

Os solos tropicais possuem elevada acidez e alta saturação por alumínio, apresentando problemas na solubilidade de seus compostos, principalmente nutrientes, sendo que, no caso do P, com a redução do pH ocorre diminuição em sua disponibilidade para as plantas. Outro ponto importante nestes solos é a CTC (capacidade de troca catiônica), cuja quantidade de cargas negativas é baixa resultando em baixa CTC, sendo que em alguns casos, apresenta cargas positivas, aumentando a adsorção de ânions como o ortofosfato (GOEDERT; SOUZA; LOBATO, 1986). Diversos trabalhos têm sugerido alternativas para solução dos problemas de fertilidade que seriam, além de melhores técnicas de

adubação e correção dos solos (Goedert et al., 1985), selecionar cultivares mais tolerantes ao alumínio, mais eficientes na absorção e utilização de fósforo, além dos demais nutrientes (BAHIA FILHO et al., 1997; FURLANI; BATAGLIA; LIMA, 1985; SAWAZAKI; FURLANI, 1987).

Hinsinger et al. (2006) citam que o volume de solo explorado pelas raízes é de apenas 0,4 a 0,8% do volume total da camada superficial, limitando drasticamente a aquisição de P, cujo o transporte ocorre preferencialmente por difusão (e não por fluxo de massa, como verificado para outros nutrientes como N, por exemplo). Como o movimento do P do solo por difusão até as raízes é restrito, a difusão geralmente é considerada como o fator mais limitante na aquisição de P pelas plantas (GRANT et al., 2001; SCHENK; BARBER, 1980). Estima-se que o P se move, em média, somente 1-2 mm por meio desse mecanismo; desta forma, apenas o P que se encontra a esta distância das raízes está estrategicamente disponível para ser absorvido.

A aquisição de P pelas plantas é proporcional à densidade das raízes; assim, o incremento da área superficial da massa radicular aumenta a habilidade da planta em acessar e absorver o P do solo. Em consequência, algumas plantas respondem às baixas concentrações de P no solo pelo aumento do sistema radicular, desenvolvendo rapidamente raízes laterais com abundantes pêlos radiculares que melhoram a habilidade da planta em explorar o solo em busca de novas reservas de P do solo, e o extraem eficientemente quando áreas com alto teor de P são encontradas. Muitas plantas formam associações com micorrizas, as quais aumentam a habilidade da cultura em adquirir o P (GRANT et al., 2001).

A deficiência de fósforo pode reduzir tanto a respiração como a fotossíntese; porém, se a respiração reduzir mais que a fotossíntese, os carboidratos se acumulam, deixando as folhas com coloração verde-escura. A deficiência também pode reduzir a síntese de ácido nucléico e de proteína,

induzindo a acumulação de compostos nitrogenados solúveis (N) no tecido. Finalmente, o crescimento da célula é retardado e potencialmente paralisado (GRANT et al., 2001).

2.2.2 Conceitos de eficiência e resposta ao fósforo (P)

O fornecimento adequado de nutrientes contribui, de forma significativa, tanto no aumento da produtividade como no aumento do custo da produção. Nesta situação, a otimização da eficiência nutricional é fundamental para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção.

Tem-se constatado ampla diversidade em várias espécies de plantas quanto à eficiência nutricional em relação ao P, como em feijão (FAGERIA, 1998), soja (VENTIMIGLIA et al., 1999), milho (PARENTONI, 2008) e sorgo (ROCHA et al., 2008; RODRIGUES et al., 2008; SCHAFFERT et al., 2001). Essa diversidade constitui a base genética para programas de melhoramento e é decorrente de uma série de mecanismos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos desenvolvidos pelas plantas quando submetidas às condições adversas de fertilidade do solo, principalmente sob estresse de P. Entretanto, alguns aspectos têm limitado avanços nessa área de pesquisa, como a falta de técnicas de cultivo para a avaliação da variabilidade genética disponível no germoplasma, pois a maioria das técnicas utilizadas não é efetiva na identificação de mecanismos desenvolvidos pelas plantas em condições naturais de campo.

Outro ponto a considerar é a identificação de um caráter de fácil avaliação para que possa ser utilizado como critério de seleção. Também, o conhecimento da dose de P adequada a ser utilizada nesses trabalhos tem sido questionado. Na busca de soluções para tais pontos críticos, várias sugestões têm

sido relatadas. Furlani et al. (1985) sugeriram a realização de estudos preliminares utilizando uma amostra dos genótipos, cultivada em doses crescentes de P para o conhecimento prévio dos caracteres e da dose adequada desse elemento que melhor discriminem os genótipos, ou seja, que detectem maior variabilidade genética, para posterior avaliação de um grande número de genótipos. Entretanto, tal proposta requer tempo, espaço e mão-de-obra. Por sua vez, as análises estatísticas dos resultados obtidos de cada caráter avaliado são feitas individualmente, o que dificulta uma interpretação mais global.

Nesse contexto, vários critérios têm sido utilizados na tentativa de melhor caracterizar a eficiência em relação ao P. Assim, no trevo branco (*Trifolium repens* L.), o controle genético da eficiência foi associado com o número de pêlos radiculares (CARADUS, 1982) e, em tomate, com o comprimento de pêlos radiculares, demonstrando ser um caráter monogênico e recessivo (HOCHMUTH; GABELMAN; GERLOFF, 1985). Já no feijão, a eficiência em relação ao P associou-se com os seguintes caracteres: produção de matéria seca/unidade de P absorvido (WHITEAKER; GERLOFF; GABELMAN, 1976), produção de matéria seca total (FAWOLE et al., 1982) e a produção de matéria seca de raiz (FAWOLE; GABELMAN; GERLOFF, 1982).

A eficiência nutricional enfatizando a utilização é geralmente definida como a biomassa total produzida pela planta por unidade de nutriente absorvido, que é equivalente ao inverso da concentração do nutriente na planta inteira. Essa relação é denominada, freqüentemente, “relação de eficiência nutricional” (FAGERIA, 1998; GOURLEY; ALLAN; RUSSELLE, 1994) e tem sido usada para descrever o requerimento interno de nutrientes de várias espécies agrônômicas. Sob o ponto de vista prático, os genótipos que produziram acima da média sob condições de baixo nível de fósforo e responderam bem ao incremento dos adubos fosfatados, são considerados os mais responsivos e mais eficientes.

O uso eficiente de nutrientes pelas plantas está relacionado à eficiência na aquisição, no transporte e na utilização de nutrientes que variam em função do genótipo e de fatores ambientais (BALIGAR; FAGERIA, 1999; MARSCHNER, 1995). Diferenças genotípicas na eficiência a alguns nutrientes têm sido atribuídas a uma série de mecanismos, que estão relacionados às características de aquisição, translocação e utilização de nutrientes pela planta, de forma isolada ou em conjunto (CLARK, 1997).

De acordo com Graham (1984) esta eficiência pode ser definida como a produção relativa de um genótipo em solo deficiente em comparação com sua produção no nível ótimo de nutrientes. Cooke (1987) define a eficiência nutricional como o aumento de produtividade por unidade de nutriente aplicado.

Diversas metodologias podem ser utilizadas para determinação da eficiência de aquisição de P pelas plantas, sendo que entre elas está a utilizada por Hocking et al. (1997) na qual compararam a capacidade de diferentes espécies vegetais em acessar P do solo, através da técnica de diluição isotópica de ^{32}P e o cálculo da atividade específica. A vantagem dessa técnica é a possibilidade de medir diretamente as diferenças entre plantas na capacidade de aquisição de P menos disponível.

Loneragan e Asher (1967) e Clark e Brown (1974) definem como eficiente, um genótipo capaz de acumular grande quantidade de P em um ambiente pobre neste nutriente. Este conceito não tem sido utilizado por não considerar a produtividade do genótipo neste ambiente. Já Fox (1978), classifica como eficiente, um genótipo capaz de produzir um máximo de matéria seca em ambiente deficiente no nutriente. Clark e Duncan (1991) reportam que, de forma geral, o conceito de eficiência nutricional em plantas, indica aquelas capazes de produzir melhor (matéria seca de parte aérea ou grãos), num dado nível de nutriente no solo.

As relações propostas por Moll et al. (1982), se aplicam as variáveis de natureza multiplicativa. Estes conceitos de eficiência se baseiam nas seguintes variáveis resposta, a serem obtidas experimentalmente: produção de grãos e palha, teor do nutriente nos grãos e na palha (%) e quantidade do nutriente disponível no solo. Com estes dados e as matérias secas de grãos e palha são obtidas as quantidades do nutriente nos grãos, na palha e em toda a parte aérea (grãos + palha).

Em solo com baixa fertilidade, a eficiência de utilização de nutriente é mais importante que a eficiência de absorção (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982; SANFORD; MACKOWN, 1986); entretanto, Moll et al. (1982) recomendam que, em desenvolvimento de genótipos para estresse nutricional, é importante levar-se em consideração a eficiência de absorção e a de utilização; ambas as características devem ser incorporadas para aumentar a eficiência nutricional.

2.2.3 Controle gênico para eficiência e resposta ao fósforo

Variabilidade genética na capacidade das plantas de absorver, translocar e utilizar nutrientes minerais tem sido verificada desde o início do século passado (HARVEY, 1939). Entretanto, somente nas últimas décadas esforços têm sido feitos no sentido de entender e explorar esta variabilidade em programas de melhoramento, o que tem se mostrado tarefa complexa, devido à herança destas características serem em geral poligênica e afetada pelo ambiente (ROSEN; KORCAK, 1989).

Clark e Duncan (1991) citam que a base genética da tolerância a baixo P em plantas pode variar entre e dentro de espécies, já que, diferentes estratégias ou mecanismos relacionados à tolerância a baixo P em plantas podem ter diferentes tipos de controle gênico.

Sobre o controle gênico destes processos, as características relacionadas à absorção de P são geralmente poligênicas (CLARKSON; HAWKESFORD, 1993; GOLDSTEIN, 1991), com dominância sendo reportada (DUNCAN, 1994); as de eficiência de utilização de P para produção de matéria seca são também poligênicas, sendo que tanto efeitos aditivos quanto dominantes têm se mostrados importantes (FAWOLE et al., 1982; FURLANI et al., 1984; GALBEMAN; GERLOFF, 1983; SILVA; GALBEMAN, 1992; SILVA; GABELMAN; COORS, 1992).

A taxa de aquisição de macronutrientes é estritamente regulada por fatores bioquímicos, os quais variam com as taxas de uso do nutriente para crescimento das plantas. Em organismos inferiores, proteínas que atuam como fatores de transcrição se ligam à região promotora do DNA que codificam enzimas chaves dos processos de assimilação do nutriente (CLARKSON; HAWKESFORD, 1993). Em plantas, os processos de adaptação à baixa disponibilidade de P são complexos. Estes processos envolvem alterações na expressão de centenas de genes (como indicado em análise de micro arranjos) e causam modificações no sistema de sinalização celular, na expressão de fatores de transcrição e na produção de hormônios vegetais como auxina e citocinina (RAGHOTAMA et al., 2006). Análise da transcrição gênica em arroz submetido a baixo P mostrou aumento na expressão de genes relacionados à glicólise, à síntese de sulfolípidos e glicolípidos e genes codificando para canais aniônicos (SHINANO et al., 2006).

Visando identificar os efeitos genéticos que controlam a herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo (EUP) em milho, Fritsche-Neto et al. (2010), realizaram um dialelo em dois níveis de disponibilidade de fósforo (alto e baixo). Os autores concluíram que a eficiência de utilização, em baixa disponibilidade de fósforo, não se correlacionou com a produtividade de grãos. Contudo, sob alta disponibilidade do nutriente, esses

parâmetros se correlacionaram. Os efeitos não aditivos têm maior importância para caracteres relacionados à EUP, de modo que a seleção deve ser realizada nas combinações híbridas.

2.3 Programa de melhoramento visando eficiência de P

Na avaliação da diversidade genotípica em programas de melhoramento quanto ao crescimento sob limitada disponibilidade de P, têm-se utilizado, preferencialmente, condições controladas de cultivo, como cultura hidropônica (FURLANI; BATAGLIA; LIMA, 1985; GABELMAN; GERLOFF, 1983) e cultivo no sistema areia-alumina (BUSO; BLISS, 1988; SILVA; GABELMAN, 1992) e, mais raramente, no solo, em vasos (ALVES et al., 1988; FÖHSE; CLAASSEN; JUNGK, 1988) e no solo, em campo (OLIVEIRA et al., 1987; PARENTONI, 2008; SCHETTINI; GABELMAN; GERLOFF, 1987). A preferência por sistemas de cultivo mais artificiais tem sido justificada pela necessidade de redução dos efeitos ambientais, em função da complexidade da relação solo-raiz (WHITEAKER; GERLOFF; GABELMAN, 1976). Embora o solo, pelos problemas de heterogeneidade, complexidade, reprodutividade dos resultados e recuperação do sistema radicular, não seja o preferido para a avaliação da tolerância, certamente é o mais indicado, quando o objetivo é a identificação de progenitores tolerantes à baixa disponibilidade de P para programas de melhoramento.

Várias características morfológicas e de eficiência se alteram quando se comparam plantas crescendo em ambientes com baixo e alto P. Baligar e Fageria (1997) estudaram as alterações de parâmetros de crescimento e parâmetros do metabolismo de P em milho cultivado em vasos sob baixo e alto P. As características de crescimento que foram mais afetadas pelos níveis de P no solo foram: relação parte aérea/raiz (aumentou 307% do nível baixo para o nível alto

de P) e massa seca de parte aérea (aumentou 159%). As características do metabolismo de P mais afetadas pelo nível de P no solo foram: quantidade de P na parte aérea (aumentou 931%) e porcentagem de P na parte aérea (297%). Os autores concluíram que massa seca de parte aérea e quantidade de P na parte aérea foram os parâmetros que mostraram mais alta sensibilidade à variação dos níveis de P no solo e maior facilidade de avaliação.

Já Oliveira et al., (1999), verificaram que o principal fator para explicar a variabilidade observada para adaptação à baixa disponibilidade de P no solo em genótipos de pimentão foi a maior biomassa de raízes dos genótipos tolerantes, enquanto que a relação raiz/parte aérea não foi identificada como característica adaptativa. Resultados semelhantes a estes últimos tem sido observados em tomate (COLTMAN; GERLOFF; GABELMAN, 1985) e em alface (BUSO; BLISS, 1988).

Com o objetivo de avaliar a resposta de dois híbridos de sorgo granífero a doses crescentes de fósforo no estado do Nordeste, Cruz et al. (2008), observaram que houve incremento de matéria seca em toda planta, no estágio fenológico de grão farináceo duro, em resposta à adubação fosfatada. O incremento do híbrido BRS304 foi de 27, 38 e 33% para as doses 25, 50 e 75 kg ha⁻¹ de P, respectivamente, e para o híbrido BRS310 esse incremento foi de 18, 27 e 38% para as doses 25, 50 e 75 kg ha⁻¹, respectivamente. Verificou-se que o mesmo ocorreu para matéria seca, em toda a planta, do híbrido BRS304, avaliadas no estágio de grão leitoso, na ordem de 21, 33 e 38 % para as doses 25, 50 e 75 kg ha⁻¹, e para o BRS310 esse incremento foi de 5, 24 e 34% para as doses 25, 50 e 75 kg ha⁻¹ de P, respectivamente. Isso indica que a cultura do sorgo responde de forma linear a adubação fosfatada, quando esta é aplicada no sulco de semeadura e que o aumento da disponibilidade de fósforo à cultura, proporcionando maior participação de grãos na matéria seca total da forragem.

Com o objetivo de selecionar genótipos de milho mais eficientes na absorção e utilização de fósforo em solos de cerrado na safrinha, Fidelis et al. (2010) avaliaram 47 genótipos em duas doses, 25 e 113 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na semeadura, respectivamente. Para identificar os cultivares adequados aos ambientes, utilizou-se a metodologia de classificação proposta por Fageria e Kluthcouski (1980). Concluiu-se que os genótipos eficientes na absorção e utilização de fósforo e responsivos ao incremento de P foram UFVM77-0331, UFVM77-0307, UFVM77-0333, UFVM77-0381, UFVM77-0313, UFVM77-0305, UFVM77-0377 e UFVM77-0345.

Estudando a eficiência e resposta ao uso de fósforo de variedades de arroz (*Oryza sativa* L.), em várzea irrigada, sob duas condições de adubação de P (20 e 120 kg ha⁻¹). Pode se concluir que, por meio da produtividade de grãos, foi possível classificar as variedades quanto à eficiência no uso e resposta à aplicação de fósforo. Demonstrando que apenas a variedade BRS-Alvorada foi classificada como eficiente quanto ao uso de fósforo e responsiva a sua aplicação (ROTILI et al., 2010).

A utilização da variabilidade genética é de extrema importância para o melhoramento visando à eficiência na absorção, utilização e no uso do fósforo. Com o objetivo de estudar uma alternativa para contornar a deficiência deste elemento em solos de cerrado, na cultura do feijoeiro, Lana et al. (2006) avaliaram a eficiência na absorção e utilização de fósforo. Para detectar tais eficiências, foi desenvolvido um experimento em casa de vegetação no qual foram avaliados oito genótipos de feijoeiro em duas doses de P₂O₅ (24 e 120 mg dm⁻³). Após 45 dias da germinação, foram analisadas as variáveis de produção de matéria seca da parte aérea e das raízes dos genótipos, conteúdo de fósforo na parte aérea e das raízes, razão raiz e a eficiência no uso do fósforo, classificando-os em quatro grupos: eficientes e responsivos, não eficientes e responsivos, eficientes e não responsivos e não eficientes e não responsivos. Os

genótipos classificados como eficientes na absorção e utilização de fósforo foram BAT 477, Jalo Precoce e Roxo, enquanto que os classificados como responsivos foram os genótipos Carioca MG, Jalo Precoce, Pérola e Roxo.

Para se estabelecer as bases de um programa de seleção para eficiência no uso de P é necessário considerar alguns aspectos chave, tais como: a) as relações existentes entre o solo e a planta na aquisição do nutriente; b) definição clara de componentes e conceitos ligados à eficiência e resposta a serem utilizados como critérios de seleção; c) conhecer a herança destes critérios de seleção; d) utilizar esta informação para traçar estratégias apropriadas de melhoramento. A existência de poucos estudos sobre critérios de seleção relacionados à eficiência e resposta ao P em plantas de sorgo crescidas em campo até a maturação têm sido relatados na literatura, principalmente em áreas tropicais. Esta informação é de grande importância para direcionar programas de seleção para estes caracteres (PARENTONI, 2008).

2.4 Análise de trilha

O conhecimento dos relacionamentos existentes entre as variáveis empregadas para o melhoramento da espécie de interesse é de suma importância uma vez que se necessita obter ganhos não para uma única variável, mas para um conjunto delas. Entretanto, as correlações não são medidas de causa e efeito e a interpretação direta das suas magnitudes pode resultar em equívocos na estratégia de seleção, pois, correlação alta entre dois caracteres pode ser resultado do efeito, sobre estes, de um terceiro caráter ou de um grupo de caracteres (DUNTEMAN, 1984), sendo, pois necessário o emprego de metodologias específicas, como as correlações parciais, correlações canônicas e análise de trilha (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004; FALCONER, 1987).

A análise de trilha, desenvolvida por Wright (1921) consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres independentes explicativos sobre uma variável dependente principal básica, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, em que as variáveis são previamente padronizadas.

Com o intuito de avaliar as correlações genóticas e seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos de componentes de produção sobre a produtividade de frutos em acessos de tomateiro, Rodrigues et al (2010) utilizou o metodologia de análise de trilha para obter tais resultados. Foram utilizados dados de 20 características, avaliadas em 132 acessos de tomateiro do grupo Salada. A análise de trilha com um único diagrama causal mostrou igual importância das variáveis primárias na determinação da produção. A análise de trilha com dois diagramas causais mostrou que a seleção simultânea do comprimento da folha e do diâmetro do entrenó pode ser uma boa alternativa para a obtenção de ganhos na produção total de frutos.

Com o objetivo de obter estimativas de coeficientes de correlação fenotípicos, genotípicos e residuais, e avaliar os desdobramentos das correlações genotípicas em efeitos diretos e indiretos (análise de trilha) em clones de capim-elefante em dois cortes, Daher et al. (2004), observou que houve grande diferença nas estimativas obtidas nos dois cortes. Entretanto, o estudo permitiu concluir que a altura das plantas no corte exerce influência na produção de matéria seca, principalmente nas situações de clones de alta capacidade de perfilhamento. As características número de perfilhos por metro linear e diâmetro de perfilhos foram capazes de explicar melhor o potencial de produção de matéria seca, atuando, respectivamente, de forma direta e inversamente proporcionas sobre a variável básica, alternando-se em função das condições ambientais ocorridas durante o crescimento.

Em batata, Silva et al. (2009), visando verificar as correlações fenotípicas, bem como a influência direta e indireta nos caracteres de aparência e

rendimento de tubérculo em gerações de seleção de batata, concluiu que maior tamanho e uniformidade de tamanho dos tubérculos proporcionam maiores rendimentos. O maior rendimento, no entanto, é acompanhado de menor peso médio e maior número de tubérculos. A aparência dos tubérculos é favorecida em genótipos que apresentam tubérculos com equilíbrio entre maior tamanho, rendimento e número, bem como, mais uniformidade em tamanho e em formato, mais arredondamento e menos curvatura e achatamento.

Utilizou-se o método de análise de trilha para obter informações básicas sobre o manejo visando aumentar a produção de sementes e a ressemeadura natural em trevo-branco, e, assim, obter condições para maior persistência da espécie na pastagem (LOPES; FRANKE, 2009). A variável que mais se correlacionou com o rendimento de sementes foi o número de inflorescências maduras ($r = 0,91$) e essa correlação ocorreu praticamente apenas pelo seu efeito direto. Nas demais variáveis, destacou-se o número de botões florais, com coeficiente de correlação alto ($r = -0,55$) e efeitos indiretos sobre os demais componentes. O número de inflorescências maduras parece ser a principal característica a ser considerada na busca de maior produção de sementes em trevo-branco.

A metodologia da análise de trilha tem sido muito utilizada para investigar as relações entre os componentes do rendimento de sementes em culturas produtoras de grãos, como arroz (ZAFFARONI et al., 1998), soja (ARCHANA-THORAT et al., 1999; BOARD; KANG; HARVILLE, 1999) e feijão (FURTADO et al., 2002), componentes da produção de matéria seca de alfafa (KEPHART et al., 1992) e, também, para o estudo do relacionamento entre características do solo e a produtividade (CORREIA et al., 1996), em eucalipto, dentre outros.

2.5 Índice de seleção

Os métodos de melhoramento, normalmente, tratam de seleção univariada, que, na maioria das vezes, não leva a materiais altamente produtivos e adaptados. Assim, deve-se considerar também a seleção para múltiplos caracteres. Para obtenção de materiais genéticos que reúnem uma série de atributos favoráveis e, portanto, mais produtivos e adaptados, uma alternativa seria usar os índices de seleção (CRUZ; REGAZZI, 2001; MULAMBA; MOCK, 1978).

Os índices de seleção permitem gerar um agregado genotípico sobre o qual se exerce a seleção, funcionando como caráter adicional, resultante da combinação de determinadas características escolhidas pelo melhorista, nas quais se deseja exercer a seleção simultânea, permitindo separar genótipos superiores, independentemente da existência ou não de correlações entre características (CASTOLDI, 1997; CRUZ; REGAZZI, 2001; HAZEL, 1943; VILARINHO et al., 2003; WILLIAMS, 1962).

Martins et al. (2003) utilizando experimentos que envolviam famílias de meios-irmãos de *Eucalyptus grandis*, em seis locais, onde foram anotados dados de circunferência à altura do peito (CAP), altura de plantas (ALT), incidência de ferrugem (FER), incidência de cancro (CAN) e número de árvores normais por parcela (NAR), foram comparadas as metodologias de seleções direta e indireta e índices de seleção (clássico e de Pesek e Baker) com relação às características avaliadas. As seleções direta e indireta não apresentaram distribuição de ganhos genéticos esperados adequada aos propósitos do presente trabalho. O índice clássico e o de Pesek e Baker apresentaram distribuição de ganhos genéticos esperados mais equilibrada.

Vasconcelos et al. (2010) com o objetivo de comparar diferentes critérios de seleção, indicar o método de seleção que propicia maiores estimativas de ganho genético e identificar genótipos superiores de alfafa quanto

a características produtivas, morfológicas e bromatológicas. Foram avaliadas oito características em 92 acessos provenientes do INTA-Argentina e os índices de Mulamba e Mock, Elston e distância do genótipo ao ideótipo foram os mais adequados a esse tipo de estudo, na qual foram selecionados 17 acessos com base nos índices.

Visando determinar a viabilidade de uso de um índice de seleção baseado em somatório de variáveis padronizadas no melhoramento genético do feijoeiro-comum, Mendes et al. (2009) avaliaram populações segregantes mais promissoras em produtividade de grãos, porte da planta e resistência ao acamamento, simultaneamente. Os dados relativos à produtividade de grãos, à nota de porte e à nota de acamamento foram padronizados (Z_{ij}) por parcela. A partir do somatório de Z_{ij} , obteve-se o índice de seleção para as três características conjuntamente. Constatou-se que o índice de seleção possibilita selecionar populações segregantes superiores, considerando simultaneamente a produtividade de grãos e as notas de porte e de acamamento. As populações segregantes CV III 8511xBRS 7762(Supremo), CV III 8511xRP 166 e CV III 8511 x RP 26 foram as indicadas para programas de melhoramento a fim de obter linhagens produtivas com plantas eretas e menor acamamento.

Pedrozo et al. (2009), compararam a eficiência de três índices de seleção construídos a partir de parâmetros genéticos e valores genotípicos preditos pela metodologia REML/BLUP, em uma população de cana-de-açúcar. Concluíram que o índice multiplicativo foi o que se mostrou maior eficiência em selecionar genótipos superiores, uma vez que esse apresentou maior coeficiente de coincidência de genótipos selecionados com a estratégia de seleção para a produção de BRIX.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. M. C. et al. Seleção de genótipos de milho para eficiência à fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 10, p. 1083-1090, out. 1988.
- ARCHANA-THORAT, D. et al. Path coefficient analysis in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Journal of Soils and Crops**, Madison, v. 9, n. 2, p. 250-251, 1999.
- BAHIA FILHO, A. F. C. et al. Identification, utilization, and economic impact of maize germplasm tolerant to low levels of phosphorus and toxic levels of exchangeable aluminum in Brazilian soils. In: MONIZ, A. C. et al. **Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Brasília: SBCS, 1997. p. 59-70.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW PH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Proceedings...** Campinas: SBCS, 1997. p. 75-97.
- _____. Plant nutrient efficiency: forward the second paradigm. In: SIQUEIRA, J. et al. **Inter-relação, fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: UFLA, 1999. p. 183-204.
- BLAIR, G. Nutrient efficiency what do we really mean? In: RANDALL, P. J. et al. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 205-213. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50).
- BOARD, J. E.; KANG, M. S.; HARVILLE, B. G. Path analysis of the yield formation process for late-planted soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 128-135, Jan. 1999.
- BUSO, G. S. C.; BLISS, F. A. Variability among lettuce cultivars grown at two levels of available phosphorus. **Plant and Soil**, The Hague, v. 111, n. 1, p. 67-73, Jan. 1988.
- CARADUS, J. R. Genetic differences in the length of root hairs in white clover and their effect on phosphorus uptake. In: SCAIFER, A. (Ed.). **Plant nutrition**. Slough: Commonwealth Agricultural Bureau, 1982. v. 1, p. 84-88.

CASTOLDI, F. L. **Comparação de métodos multivariados aplicados na seleção em milho**. 1997. 118 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 41, n. 3, p. 227-234, Jan. 1995.

CLARK, R. B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 72, n. 2/3, p. 175-196, June 1997.

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, v. 14, p. 505-508, 1974.

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

CLARKSON, D. T.; HAWKESFORD, M. J. Molecular biological approaches to plant nutrition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 155/156, n. 1, p. 21-31, Jan. 1993.

COLTMAN, R. R.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Differential tolerance of tomato strains to maintained and deficient levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 110, n. 2, p. 140-144, Apr. 1985.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Produção brasileira de sorgo granífero**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

COOKE, G. W. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 10, n. 1, p. 1357-1369, Jan. 1987.

CORREIA, J. R. et al. Análise de trilha (“path analysis”) no estudo do relacionamento entre características físicas e químicas do solo e a produtividade do eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 161-169, jan./mar. 1996.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2001. 390 p.

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

CRUZ, S. S. C. et al. Adubação fosfatada para o sorgo granífero. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

DAHER, R. F. et al. Análise de trilha de caracteres forrageiros do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1531-1535, set./out. 2004.

DUNCAN, R. R. Genetic manipulation. In: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant-environment interactions**. New York: M. Dekker, 1994. p. 1-38.

DUNTEMAN, G. H. **Introduction to multivariate analysis**. Beverly Hills: Sage, 1984. 237 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do sorgo**. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo/index.htm>>. Acesso em: 8 jul. 2009.

FAGERIA, N. D.; KLUTHCOUSKI, J. **Metodologia para avaliação de cultivares de arroz e feijão para condições adversas de solo**. Brasília: EMBRAPA-CNPAP, 1980. 22 p.

FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 128-131, 1998.

FALCONER, D. S. **Introdução à genética quantitativa**. Viçosa, MG: UFV, 1987. 279 p.

FAWOLE, I. et al. Heritability of efficiency in phosphorus utilization in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. **Journal of American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 107, n. 1, p. 94-97, Feb. 1982.

FAWOLE, I.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. Genetic control of root development in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 107, n. 1, p. 98-100, Jan. 1982.

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

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 110, n. 1, p. 101-109, 1988.

FOX, R. H. Selection for phosphorus efficiency in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9, n. 1, p. 13-37, 1978.

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

FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; LIMA, M. Eficiência de linhagens de milho na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 1, p. 129-147, 1985.

FURLANI, A. M. C. et al. Sorghum genotype differences in phosphorus uptake rate and distribution in plant parts. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, n. 7, p. 1113-1126, July 1984.

FURTADO, M. R. et al. Análise de trilha do rendimento do feijoeiro e seus componentes primários em monocultivo e em consórcio com a cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 217-220, mar./abr. 2002.

GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, n. 2/3, p. 335-350, Jan. 1983.

GNIASZDOWSKA, A. et al. Low phosphorus nutrition alters beans plants' ability to assimilate and translocate nitrate. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 22, n. 3, p. 551-563, Mar. 1999.

GOEDERT, W. J.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

GOLDSTEIN, A. H. Plant cells selected for resistance to phosphate starvation show enhanced P use efficiency. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 82, n. 2, p. 191-194, Jan. 1991.

GOURLEY, C. J. P.; ALLAN, D. L.; RUSSELLE, M. P. Plant nutrient efficiency: a comparison of definitions and suggested improvement. **Plant and Soil**, The Hague, v. 158, n. 1, p. 29-37, Jan. 1994.

GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LAUCHI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p. 57-102.

GRANT, C. A. et al. **A importância do fósforo no desenvolvimento da planta**. Piracicaba: POTAFOS, 2001. 5 p. (Informações Agronômicas, 95).

HARVEY, P. H. Hereditary variation in plant nutrition. **Genetics**, Baltimore, v. 24, p. 437-461, 1939.

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

HISINGER, P. et al. The roots of phosphorus acquisition efficiency in crops. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. p. 75-76.

HOCHMUTH, G. J.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. A gene affecting tomato root morphology. **HortScience**, Alexandria, v. 20, n. 6, p. 1099-1101, Dec. 1985.

HOCKING, P. J. et al. Comparison of the ability of different crop species to access poorly-available soil phosphorus. In: ANDO, T. et al. (Ed.). **Plant nutrition: for sustainable food production and environment**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. p. 305-308.

HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 35, n. 2, p. 227-239, July 1997.

KEPHART, K. D. et al. Alfalfa yield components responses to seeding rate several years after establishment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 5, p. 827-831, Sept. 1992.

LANA, R. M. Q. et al. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 778-784, maio/jun. 2006.

LANDAU, E. C.; MENDES, S. M.; LONGO, L. A. Análise espaço-temporal da expansão do sorgo granífero no Brasil entre 1975 e 2008. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

LONERAGAN, J. F.; ASHER, C. J. Response of plantas to phosphate concentration in solution culture. **Soil Science**, Baltimore, v. 103, p. 311-318, 1967.

LOPES, A. S. **Solos sob “Cerrado”**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

LOPES, R. R.; FRANKE, L. B. Análise de trilha dos componentes do rendimento de sementes de trevo-branco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, n. 10, p. 1865-1869, out. 2009.

MALAVOLTA, E.; PONCHIO, C. O. Utilização eficiente do fósforo no sistema solo-planta. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 75-132.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of hight plants**. San Diego: Academic, 1995. 889 p.

MARTINS, I. S. et al. Eficiência da seleção univariada direta e indireta e de índices de seleção em *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 327-333, maio/jun. 2003.

MENDES, B. V. **Alternativas tecnológicas para a agricultura do semi-árido**. São Paulo: Nobel, 1986. 171 p.

MENDES, F. F.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B. Índice de seleção para escolha de populações segregantes de feijoeiro-comum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 10, p. 1312-1318, out. 2009.

MENELAU, A. S. Abertura de novas fronteiras para as culturas de milho e de sorgo no Nordeste: pólos industriais x bolsões de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998, Recife. **Resumos...** Recife: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 1998. 1 CD-ROM.

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, n. 2, p. 562-564, Jan. 1982.

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

NOVAIS, F. R.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, I. P. et al. Avaliação de cultivares de feijão quanto a eficiência no uso do fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 39-45, jan. 1987.

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

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

PEDROZO, C. A. et al. Eficiência de índices de seleção utilizando a metodologia REML/BLUP no melhoramento da cana-de-açúcar. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 31-36, jan. 2009.

RAGHOTHAMA, K. G. et al. Molecular regulation of phosphate starvation responses in plants. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. p. 86.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado**. 2004. 169 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

ROCHA, M. C. et al. Caracterização da morfologia radicular de linhagens de sorgo contrastantes para eficiência do uso de fósforo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, F. et al. Avaliação de dez cultivares de sorgo em dois níveis de fósforo em solo de cerrado em casa de vegetação. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, G. B. et al. Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 155-162, fev. 2010.

ROSEN, C. J.; KORCAK, R. F. Introduction to the colloquium. **HortScience**, Alexandria, v. 24, n. 4, p. 558-559, June 1989.

ROTILI, E. A. et al. Eficiência no uso de fósforo de variedades de arroz cultivadas em solos de várzea irrigada. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 3, p. 415-420, maio/jun. 2010.

SANFORD, D. A. van; MACKOWN, C. T. Variation in nitrogen use efficiency among soft red winter wheat genotypes. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 72, n. 2, p. 152-163, May 1986.

SAWAZAKI, E.; FURLANI, P. R. Genética da tolerância ao alumínio em milho cateto. **Bragantia**, Campinas, v. 46, n. 2, p. 269-278, ago. 1987.

SCHAFFERT, R. E. et al. Genetic variability in shorghum for efficiency and responsiveness. In: _____. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems**. Netherlands: Academics, 2001. p. 72-73.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, The Hague, v. 54, n. 1, p. 65-76, Jan. 1980.

SCHETTINI, T. M.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. Incorporation of phosphorus efficiency from exotic germplasm into agriculturally adapted germplasm of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 99, n. 1, p. 175-184, Feb. 1987.

SHINANO, T. et al. Proteomic analysis of rice response on P deficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. p. 134-135.

SILVA, A. E. da; GABELMAN, W. H. Screening maize inbred lines for tolerance to low-P stress condition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 146, n. 2, p. 181-187, Sept. 1992.

SILVA, A. E. da; GABELMAN, W. H.; COORS, J. G. Inheritance studies of low-phosphorus tolerance in maize (*Zea mays* L.), grown in a sand-alumina culture medium. **Plant and Soil**, The Hague, v. 146, n. 1/2, p. 189-197, Oct. 1992.

SILVA, G. O. et al. Correlações entre caracteres fenotípicos e análise de trilha para aparência e rendimento de batata. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 56, n. 1, p. 63-68, jan./fev. 2009.

TUINSTRRA, M. R. et al. Genetic analysis of post-flowering drought tolerance and components of grain development in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Molecular Breeding**, Dordrecht, v. 3, n. 6, p. 439-448, Dec. 1997.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Cambridge, v. 157, n. 3, p. 423-447, Mar. 2003.

VASCONCELOS, E. S. et al. Estimativas de ganho genético por diferentes critérios de seleção em genótipos de alfafa. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 2, p. 205-210, mar./abr. 2010.

VENTIMIGLIA, L. A. et al. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 195-199, fev. 1999.

VILARINHO, A. A. et al. Eficiência da seleção de progênies S1 e S2 de milho-pipoca, visando à produção de linhagens. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 9-17, abr. 2003.

WHITEAKER, G.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 101, n. 4, p. 472-475, July 1976.

WILLIAMS, J. S. The evaluation of a selection index. **Biometrics**, Washington, v. 18, p. 375-393, 1962.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal Agriculture Research**, Collingwood, v. 20, p. 557-585, 1921.

ZAFFARONI, E. et al. Análise de caminho nos componentes do rendimento de genótipos de arroz no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 43-48, jan. 1998.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SORGO
EFICIENTES E RESPONSIVAS AO FÓSFORO**

**O artigo será enviado para o Periódico Científico Crop Breeding and
Applied Biotechnology (Redigido conforme normas da revista)**

RESUMO – A otimização da eficiência nutricional é fundamental para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar quais caracteres devem ser considerados na seleção de genótipos de sorgo eficientes e responsivos ao fósforo. Realizou-se o desdobramento das correlações entre os caracteres avaliados em efeitos diretos e indiretos das variáveis básicas de eficiência e resposta por meio da análise de trilha. O caráter mais indicado para a avaliação da eficiência de linhagens de sorgo ao fósforo foi o índice de colheita de fósforo para eficiência de utilização e massa seca de grãos para eficiência de absorção e uso, sob condições de estresse. O caráter mais indicado para a avaliação da resposta ao fósforo, em linhagens de sorgo, foi o caráter massa seca de grãos para eficiência de recuperação aparente, eficiência fisiológica e eficiência agrônômica, sob condições adequadas de adubação.

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

ABSTRACT – Optimization of nutritional efficiency is important for increasing crop productivity and reducing production cost. Thus, the objective of this study was to assess which traits should be considered in the selection of sorghum genotypes efficient and responsive to P. We carried out the deployment of these correlations for direct and indirect effects of the basic variables of efficiency and responsiveness through path analysis. The traits most suitable for assessing the efficiency of sorghum lines for phosphorus was harvest index for phosphorus to utilization efficiency and dry weight of grain for the absorption and use efficiency, under stress conditions. The parameters most suitable for assessing the response to phosphorus on sorghum lines was the dry mass of grain for the apparent recovery efficiency, physiological efficiency and agronomic efficiency, under appropriate conditions of fertilization.

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

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento adequado de nutrientes contribui, de forma significativa, tanto no aumento da produtividade como para reduzir o custo de produção. Nesta situação, a otimização da eficiência nutricional é fundamental para ampliar a produtividade e reduzir o custo de produção. Atualmente, existem várias definições sobre eficiência nutricional, entre as citadas na literatura estão as de Loneragan e Asher (1967) e Clark e Brown (1974) que definem como eficiente, um genótipo capaz de acumular grande quantidade de determinado nutriente em um ambiente pobre neste nutriente. Este conceito não tem sido utilizado por não considerar a produtividade do genótipo neste ambiente. Já Fox (1978), classifica como eficiente, um genótipo capaz de produzir um máximo de matéria seca em ambiente deficiente no nutriente. Clark e Duncan (1991) reportam que, de forma geral, o conceito de eficiência nutricional em plantas, indica aquelas capazes de produzir melhor (matéria seca de parte aérea ou grãos), num dado nível de nutriente no solo.

Além desses já citados, existem muitos outros relatados na literatura como os propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), na qual consideram apenas um ambiente e aqueles relacionados à reposta como os propostos por Crasweel e Godwin (1984) que consideram a interação entre os ambientes contrastantes no nutriente.

Com o intuito de entender melhor a associação entre caracteres, Wright (1921) propôs um método denominado análise de trilha (*path analysis*) que desdobra as correlações estimadas em efeitos diretos e indiretos de cada caráter sobre uma variável básica, que segundo Cruz et al. (2004), é estabelecido pelo conhecimento prévio do pesquisador e que possibilita a análise de inter-relações expressas em diagramas de trilha. O sucesso dessa análise reside basicamente na formulação do relacionamento de causa-efeito entre os caracteres.

O objetivo deste trabalho foi obter as estimativas do coeficiente de correlação fenotípica e avaliar os desdobramentos das correlações em efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes (explicativas) nas variáveis dependentes (básicas) de eficiência e resposta ao fósforo em linhagens de sorgo, visando identificar caracteres que discriminem as linhagens para seleção.

2 MATERIAL E MÉTODOS

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

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial simples 30x2 (30 linhagens de sorgo em dois níveis com três repetições). Foram selecionadas cinco linhagens para compor cada grupo (cinco eficientes e responsivas, cinco eficientes e não responsivas, cinco ineficientes e responsivas e cinco ineficientes e não responsivas) selecionadas de acordo com a metodologia proposta por Fageria e Barbosa (1982) e mais dez testemunhas.

As parcelas experimentais constituídas por duas linhas de 4 m, com espaçamento entre plantas de 0,15 m e entre linhas de 0,45 m.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens, para os dois ambientes. A adubação de plantio foi realizada no sulco, de acordo com análise de solo, na qual o controle (adubação padrão) foram aplicados 190 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo, 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 67 kg ha⁻¹ de uréia com o intuito de alcançar um nível de 35 mg dm³ de P. No ambiente sob estresse (baixo P – 6 mg dm³) não foi aplicado qualquer tipo de adubo fosfatado e 110 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 67 kg ha⁻¹ de uréia.

Tabela 1 Principais atributos químicos do solo (0-20 cm de profundidade) após aplicação dos fertilizantes. Sete Lagoas, MG, 2010

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

Metodologias descritas em Embrapa (1999); mb - muito bom, b – bom, m – médio, ba - baixo e mba – muito baixo

Foram avaliados os caracteres (ou variáveis explicativas) massa fresca da parte aérea (MFPA), obtida pela pesagem de três plantas inteiras representativas da parcela, medido em gramas, posteriormente transformado para kg ha^{-1} ; massa seca da parte aérea (MSPA), obtida pela pesagem de três plantas inteiras, colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 70°C , durante 72 horas e posteriormente, pesadas, sendo medido em gramas, posteriormente transformado para kg ha^{-1} ; teor de fósforo nos grãos (TFG), os grãos obtidos nas parcelas foram homogeneizados e retirada uma amostra, na qual foi enviada ao laboratório utilizando para a medição do teor de fósforo pelo método espectrofotométrico de análise de azul de molibdênio (Silva, 1999), medido em g kg^{-1} ; teor de fósforo na parte aérea da planta (TFPA), uma planta de cada parcela sem panícula e sem raiz, em cada uma das 3 repetições, posteriormente, moídas, homogeneizadas e retirada uma amostra, no qual foi enviada ao laboratório, medido em g kg^{-1} ; índice de colheita de fósforo (ICF), é a razão entre o teor de fósforo nos grãos e o teor de fósforo na parte aérea da planta, medido em kg kg^{-1} ; quociente de utilização (QUTIL), que é a razão entre a produtividade pelo teor de P nos grãos, medido em kg kg^{-1} ; massa seca de grãos (MSG) uma amostra dos grãos foi colocada em estufa de circulação forçada de ar a 70°C , durante 72 horas e posteriormente, pesada, sendo medida em gramas, posteriormente transformado para t ha^{-1} , sendo que todas as variáveis foram medidas aos 120 dias após a semeadura.

Com relação à eficiência sob condições de estresse nutricional ou adubação adequada, os caracteres utilizados foram os propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), onde a eficiência de absorção (EFA) é definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo à razão entre kg de P na planta e $\text{kg de P disponível no solo}$ – kg kg^{-1} (Tabela 1); eficiência de utilização (EFUTIL), definida como a capacidade do genótipo de utilizar o P absorvido pela planta para produzir grãos,

correspondendo à razão entre kg de massa seca de grãos produzidos e kg de P na planta – kg kg⁻¹; eficiência de uso (EFUSO) definida como o produto entre a eficiência de absorção e utilização de P, correspondendo a kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo – kg kg⁻¹.

A responsividade foi avaliada pelos caracteres propostos por Crasweel e Godwin (1984), onde a diferença de produtividade (DFPROD) é definida pela diferença de produtividade de grãos entre os níveis controle e estresse – t ha⁻¹, produtividade relativa (PREL) definida como a diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse dividida pelo controle - %, eficiência fisiológica (EFISIO) definida pela diferença de produtividade de grãos entre os níveis controle e estresse por unidade adicional de nutriente na planta entre ambientes – kg kg⁻¹; eficiência de recuperação aparente (EFREC) definida como a capacidade do genótipo em recuperar o nutriente aplicado ao solo entre os ambientes controle e estresse, ou seja, DFPROD dividido pela diferença de P no solo entre os ambientes; eficiência agrônômica (EFAGRO) definida pela diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse por kg de P aplicado – kg kg⁻¹.

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

$$r_F = \frac{COV_{F(xy)}}{\sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2}}$$

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

σ_x^2 : corresponde à variância fenotípica do caráter x;

σ_y^2 : corresponde à variância fenotípica do caráter y.

Realizou-se o desdobramento dessas correlações em efeitos diretos e indiretos dos caracteres sobre três variáveis de eficiência e três variáveis resposta por meio da análise de trilha com único diagrama causal, descrita por

Cruz et al. (2004), utilizando o programa computacional Genes (Cruz 2010) e para a avaliação da significância da correlação utilizou-se o teste t para as correlações fenotípicas, segundo a metodologia proposta por Steel e Torrie (1980).

Para análise dos dados adotou-se um diagrama causal ilustrativo considerando as variáveis básicas EFA, EFUSO e EFUTIL – Eficiência e EFREC, EFISIO e EFAGRO – Resposta, conforme ilustrado na Figura 1. Nesta observa-se o inter-relacionamento das variáveis analisadas, onde a seta unidirecional indica o efeito direto de cada variável explicativa, enquanto as setas bidirecionais representam a interdependência de duas variáveis explicativas, cuja magnitude é quantificada pela correlação fenotípica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas dos coeficientes de correlações fenotípicas avaliadas para os 10 caracteres associados à eficiência de fósforo para a cultura do sorgo estão apresentadas na Tabela 2. Nota-se que houve correlação positiva e significativa para a maioria dos caracteres avaliados.

Observa-se correlação significativa e positiva de alta magnitude entre TFPA com MSPA, MSG e EFUSO, entre MSPA com MFPA, MSG, EFA e EFUSO, e entre QUTIL com MSG e EFUSO. A alta estimativa da correlação facilita o processo de seleção para eficiência de fósforo, pois, reduz o número de caracteres avaliados e sem a necessidade de medições e/ou pesagens adicionais. Resultados semelhantes foram obtidos por Fox (1978) e Parentoni (2008) em milho.

Verifica-se que EFUTIL possui uma correlação de baixa magnitude e não significativa para a maioria dos caracteres avaliados, o que demonstra que haverá maior dificuldade em selecionar genótipos que apresentem uma boa eficiência de utilização e demais eficiências ao mesmo tempo (Tabela 2). O conhecimento da correlação entre caracteres pode ser primordial quando o objetivo é a seleção simultânea de caracteres, ou quando um caráter de interesse revelar baixa herdabilidade, sendo de difícil identificação. Ao selecionar um caráter de alta herdabilidade, de fácil aferição e identificação, e que evidencie alta correlação com o caráter desejado, o melhorista poderá obter progressos mais rápidos em relação ao uso de seleção direta (Falconer e Mackay 1996).

A falta de correlação ou a baixa magnitude do caráter TFG com os caracteres demais caracteres indica que a seleção de genótipos com alto ou baixo teor de fósforo nos grãos não deverá afetar em outros caracteres de forma previsível, nos genótipos estudados.

É conveniente salientar que alguns caracteres são redundantes, devido ao alto valor positivo da correlação e sua alta significância. Isso pode ser observado pela correlação entre os caracteres TFPA e EFA (0,98) e MSG e EFUSO (0,98) entre os caracteres de eficiência (Tabela 2) e TFPA e EFA (0,99), MSG e EFUSO (0,99) e DFPROD e EFAGRO (0,99) entre os caracteres de resposta (Tabela 3). Registra-se que independentemente do nível a ser avaliado, maior TFPA e MSG são caracteres que indicam a maior eficiência de absorção e uso de fósforo em linhagens de sorgo.

A resposta a adubação de fósforo pode ser medida pela avaliação do caráter QUTIL, pois o caráter apresentou correlação de média à alta magnitude com todas variáveis analisadas para resposta, variando de 0,44 a 0,78 (EFISIO e EFUSO). Isso indica que para uma pré-seleção de linhagens de sorgo mais responsivas ao fósforo esse caráter é o mais indicado e possui a vantagem da avaliação somente no nível controle (com adubação), o que diminui gastos em estágios iniciais de melhoramento visando seleção de linhagens mais responsivas.

Pela Tabela 3 é possível observar que a correlação do caráter QUTIL foi positiva, significativa e de boa magnitude com os demais caracteres, indicando que haverá ganho positivo em TFPL, MSPA, MFPA e MSG, exceto para TFG e ICP (-0,41 e -0,79). Vê-se que TFPL, MSPA e MSG possuem essa característica também, com exceção de EFUTIL e EFISIO e podem ser adicionadas aos critérios de seleção para resposta.

Deve-se levar em consideração que uma correlação não implica em uma relação de causa e efeito entre as variáveis analisadas. O estudo das correlações entre caracteres não permite tirar conclusões sobre isto e, sim, sobre uma medida de associação (Vencovsky e Barriga 1992). Por isso, procedeu-se a análise de trilha (*path analysis*), a qual investiga a relação de causa-efeito e fornece as quantidades dessas relações, denominados coeficientes de trilha. As estimativas

dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre a EFA, EUTIL e EFUSO para eficiência e EFREC, EFISIO e EFAGRO para resposta a aplicação de fósforo (Tabela 4).

Os coeficientes de determinação (r^2), no modelo da análise de trilha, evidenciam que as variáveis explicativas que foram utilizadas no estudo explicam quase toda a variação nas variáveis básicas (Tabela 4). Nota-se, também, os elevados valores das variâncias residuais nas variáveis básicas de resposta, variando de 0,35 a 0,73 (EFISIO e EFAGRO). Isso indica que para a avaliação da resposta a adubação fosfatada são necessárias mais variáveis explicativas a fim de explicar melhor a variação que ocorreu nas variáveis básicas.

Para fins de melhoramento, é importante identificar, dentre os caracteres de alta correlação com a variável básica, aqueles de maior efeito direto em sentido favorável a seleção, de tal forma que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja eficiente (Cruz et al. 2004). Dessa forma, o TFPA para a variável básica EFA e MSG para EFUSO são os caracteres mais indicados para a avaliação da eficiência, confirmados pela significância da correlação e por superar a variância residual em ambos os casos (Tabela 2 e 4). Com relação às variáveis básicas para resposta, os caracteres mais indicados são TFPA e MSPA para EFREC e MSPA para EFAGRO apresentando significância e superam a variância residual.

Algumas variáveis, apesar de terem uma alta associação total com a variável básica, podem não ser a causa determinante das variações sobre o caráter de interesse. Neste caso, a concentração de esforços na seleção desta variável poderá não resultar em ganhos satisfatórios na variável básica (Cruz et al., 2004). As situações descritas manifestam-se na relação de MSPA, MFPA, QUTIL e MSG em EFA, sendo que o mesmo fato ocorre para TFPA, MSPA, MFPA e QUTIL em EFUSO e MSG em EFREC. Consta-se pela análise de

trilha, que essas associações são, fundamentalmente, determinadas pelo efeito indireto de outra variável. Percebe-se esse efeito na variável MSPA em EFA, onde o efeito direto sob EFA é extremamente baixo e bem próximo do valor do efeito residual. Entretanto, o seu efeito total tem alta magnitude devido ao efeito indireto do TFPA. Conseqüentemente, basear-se na seleção de MSPA para a obtenção de ganhos em EFA, sem levar em consideração TFPA, não será uma boa estratégia para o programa de melhoramento.

Outro fato relevante é que variáveis com baixa associação com a variável básica, mas, com seu efeito direto de alta magnitude denotam que essa variável não deve ser totalmente descartada do uso de seleções indiretas. Como é possível observar nas variáveis TFPA, ICP e MSG na variável básica EFUTIL e nas variáveis de resposta MSG em EFISIO e TFG em EFAGRO (Tabela 4). Apesar de apresentarem baixa correlação simples significativa ou não serem significativas, isto sugere que na seleção para EFUTIL, EFISIO e EFAGRO esses caracteres devem ser levados em consideração e dessa forma, poderá proporcionar melhores resultados. É essencial relatar que caracteres como TFG em EFISIO, também devem ser analisados com maior cuidado, pois, seu efeito é negativo e de média magnitude, mas seu efeito direto possui elevado valor.

Os resultados da análise de trilha evidenciam que alguns caracteres apresentam baixo efeito total e direto, porém, são influenciados por outros caracteres na variável básica, como MSPA, MFPA, QUTIL em EFUTIL, TFPA, MSPA, MFPA, ICP em EFISIO e TFG, MFPA em EFAGRO, o que denota que essas variáveis explicativas podem ser descartadas e adicionadas outras, a fim de selecionar variáveis que expliquem melhor a variação das características e dessa forma, diminuir a variância residual.

As variáveis explicativas com maior efeito direto e indicadas para a seleção de genótipos com maior eficiência de fósforo são TFPA para EFA, ICF para EFUTIL e MSG para EFUSO sob condições de estresse de fósforo.

Entretanto, a correlação existente entre MSG e TFPA é alta e significativa, indicando que a seleção praticada em apenas uma trará ganhos na outra. Ou seja, a avaliação do caráter MSG já é suficiente para obter ganhos para EFA e EFUSO.

Fato semelhante ocorreu com as variáveis explicativas de maior efeito direto e indicadas para a seleção de genótipos responsivos ao fósforo, na qual os caracteres mais indicados foram TFPA e MSG para EFREC, QUTIL para EFISIO e MSPA para EFAGRO em condições de adubação adequada. Houve correlação de alta magnitude e significativa das variáveis TFPA, MSG e QUTIL. Como o caráter MSG é de fácil obtenção e não gastos com análises laboratoriais, é o mais indicado para a seleção.

4 CONCLUSÕES

O caráter mais indicado para a avaliação da eficiência de linhagens de sorgo ao fósforo foi índice de colheita de fósforo para eficiência de utilização e massa seca de grãos para eficiência de absorção e uso, sob condições de estresse.

O caráter mais indicado para a avaliação da resposta ao fósforo, em linhagens de sorgo, foi o caráter massa seca de grãos para eficiência de recuperação aparente, eficiência fisiológica e eficiência agronômica, sob condições adequadas de adubação.

REFERÊNCIAS

- CLARK RB, BROWN JC (1974) Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds **Crop Science** Madison v14 p505-508.
- CLARK RB , DUNCAN RR (1991) Improvement of plant mineral nutrition through breeding **Field Crops Research** Amsterdam 27 p219-240.
- CRASWELL ET, GODWIN DC (1984) The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals growing in different climates In:TINKER PB , LAUCHLI A (Ed) **Advances in plant nutrition** New York:Praeger p1-55.
- CRUZ CD (2010) **Programa Genes: Versão Windows**, aplicativo computacional em genética e estatística Viçosa MG: Universidade Federal de Viçosa.
- CRUZ CD, REGAZZI AJ, CARNEIRO CS (2004) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético** 3ed Viçosa: UFV 480p.
- FAGERIA NK, BARBOSA FILHO MP Avaliação preliminar de cultivares de arroz irrigado para maior eficiência de utilização de nitrogênio **Pesquisa Agropecuária Brasileira** Brasília v17 n12 p1709-1712 dez 1982.
- FALCONER DS, MACKAY JFC (1996) **Introduction to Quantitative Genetics** 4 ed Malaysia: Lonman 464p
- FOX RH (1978) Selection for phosphorus efficiency in corn **Communications in Soil Science and Plant Analysis** New York v9 n1 p13-37.
- LONERAGAN JF, ASHER CJ (1967) Response of plants to phosphate concentration in solution culture **Soil Science** V103 p311-318.
- MOLL RH, KAMPRATH EJ, JACKSON WA (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization **Agronomy Journal** Madison v 74 p 562-564.
- PARENTONI SN (2008) **Estimativa de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical** 207p (Tese-Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Piracicaba-SP.

SILVA FC da (1999) **Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes** Brasília DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, Rio de Janeiro: Embrapa Solos , Campinas: Embrapa Informática Agropecuária 370 p.

STEEL RGD, TORRIE JH (1980) Principles and produceres of statistics: a biometrical approach 2ed New York: McGraw-Hill 631p.

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

WRIGHT S (1921) Correlation and causation **Journal Agriculture Research** Collingwood v20 p 557-585.

ANEXOS

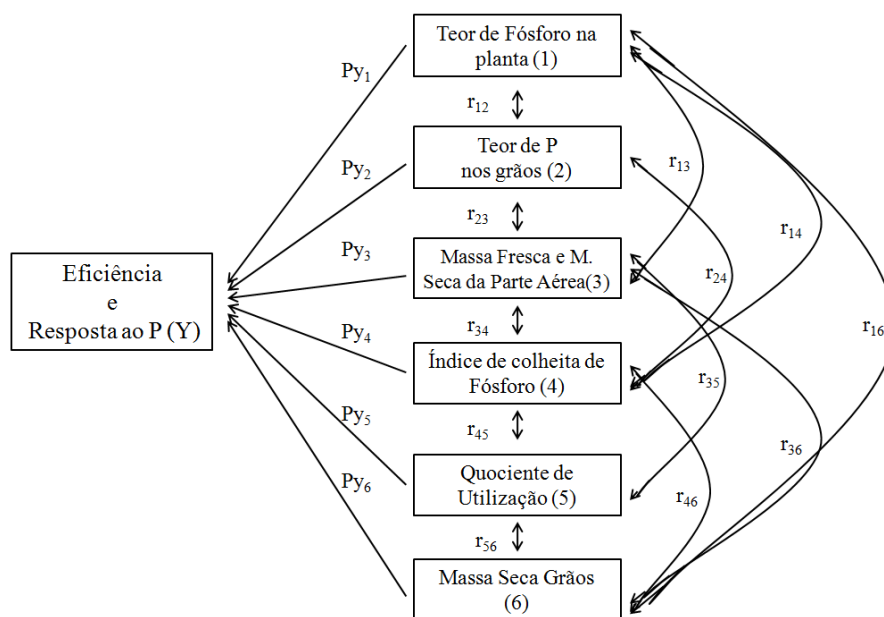


Figura 1 Efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre as variáveis básicas de eficiência e resposta. Sete Lagoas, MG, 2010

Py_i : efeito direto de cada uma das seis variáveis explicativas sobre a variável básica
 r_{ij} : coeficiente de correlação fenotípica entre os caracteres explicativos

Tabela 2 Coeficientes de correlação fenotípica entre 10 caracteres sob condição de estresse de fósforo - teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL) e eficiência de uso (EFUSO). Sete Lagoas, MG, 2010

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

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

Tabela 3 Coeficientes de correlação fenotípica entre 10 caracteres sob condição de adubação de fósforo - teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL) e eficiência de uso (EFUSO) e mais cinco variáveis resposta obtidas pela interação entre os níveis com e sem adubação- diferença de produtividade (DFPROD), produtividade relativa (PREL), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência agrônômica (EFAGRO). Sete Lagoas, MG, 2010

VARIÁVEIS	TFG	MSPA	MFPA	ICF	QUTIL	MSG	EFA	EFUTIL	EFUSO	DFPROD	PREL	EFREC	EFISIO	EFAGRO
TFPA	0,36*	0,92**	0,69**	-0,79**	0,55**	0,87**	0,99**	-0,15 ^{N.S}	0,87**	0,52**	0,45*	0,78**	-0,26 ^{N.S}	0,52**
TFG		0,27 ^{N.S}	0,27 ^{N.S}	0,16 ^{N.S}	-0,41*	0,19 ^{N.S}	0,36*	-0,49**	0,19 ^{N.S}	0,10 ^{N.S}	0,10 ^{N.S}	0,26 ^{N.S}	-0,57**	0,10 ^{N.S}
MSPA			0,80**	-0,75**	0,67**	0,94**	0,92**	0,08 ^{N.S}	0,94**	0,57**	0,46**	0,79**	-0,20 ^{N.S}	0,57**
MFPA				-0,53**	0,36*	0,59**	0,69**	-0,19 ^{N.S}	0,59**	0,29 ^{N.S}	0,26 ^{N.S}	0,51**	-0,22 ^{N.S}	0,29 ^{N.S}
ICF					-0,79**	-0,77**	-0,79**	-0,17 ^{N.S}	-0,77**	-0,54**	-0,55**	-0,56**	-0,15 ^{N.S}	-0,54**
QUTIL						0,78**	0,55**	0,58**	0,78**	0,53**	0,45**	0,50**	0,44*	0,53**
MSG							0,87**	0,31 ^{N.S}	0,99**	0,62**	0,51**	0,78**	-0,11 ^{N.S}	0,62**
EFA								-0,15 ^{N.S}	0,87**	0,52**	0,45*	0,78**	-0,26 ^{N.S}	0,52**
EFUTIL									0,31 ^{N.S}	0,24 ^{N.S}	0,12 ^{N.S}	0,03 ^{N.S}	0,45*	0,24 ^{N.S}
EFUSO										0,62**	0,51**	0,78**	-0,11 ^{N.S}	0,62**
DFPROD											0,92**	0,63**	0,14 ^{N.S}	0,99**
PREL												0,54**	0,17 ^{N.S}	0,92**
EFREC													-0,30 ^{N.S}	0,63**
EFISIO														0,14 ^{N.S}

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

Tabela 4 Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas, teor de fósforo na planta (TFPA), teor de fósforo no grão (TFG), massa seca parte aérea (MSPA), massa fresca parte aérea (MFPA), índice de colheita de fósforo (ICF), quociente de utilização (QUTIL), massa seca de grãos (MSG) sob as variáveis básicas, eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFISIO) e eficiência de agrônômica (EFAGRO) em linhagens de sorgo. Sete Lagoas, MG, 2010

Variáveis Explicativas		Variáveis Básicas					
		Eficiência			Resposta		
		EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO
TFPA	Efeito direto sobre	0.997	-1.121	0.001	0.570	-0.113	-0.555
	Efeito indireto via TFG	0.000	0.001	0.000	-0.109	0.350	0.165
	via MSPA	-0.003	-0.118	0.004	0.596	-0.360	1.021
	via MFPA	0.001	-0.045	-0.001	-0.165	0.008	-0.339
	via ICF	0.002	-0.482	-0.001	-0.249	0.126	0.381
	via QUTIL	-0.010	-0.187	-0.001	-0.179	1.376	0.226
	via MSG	0.013	1.574	0.845	0.319	-1.645	-0.379
	TOTAL	1.000	-0.377	0.847	0.783	-0.258	0.520
TFG	Efeito direto sobre	-0.003	-0.294	-0.001	-0.303	0.971	0.460
	Efeito indireto via TFPA	-0.005	0.006	0.000	0.205	-0.041	-0.200
	via MSPA	0.000	-0.006	0.000	0.174	-0.105	0.298
	via MFPA	0.000	-0.011	0.000	-0.066	0.003	-0.135
	via ICF	-0.001	0.276	0.000	0.050	-0.025	-0.076
	via QUTIL	0.008	0.156	0.000	0.132	-1.015	-0.167
	via MSG	-0.002	-0.294	-0.158	0.069	-0.355	-0.082
	TOTAL	-0.004	-0.167	-0.158	0.261	-0.566	0.099
MSPA	Efeito direto sobre	-0.003	-0.137	0.005	0.650	-0.392	1.113
	Efeito indireto via TFPA	0.854	-0.961	0.000	0.522	-0.103	-0.509
	via TFG	0.000	-0.012	0.000	-0.081	0.260	0.123
	via MFPA	0.001	-0.057	-0.002	-0.190	0.010	-0.391
	via ICF	0.002	-0.424	0.000	-0.238	0.120	0.364

Tabela 4, continuação

Variáveis Explicativas		Variáveis Básicas					
		Eficiência			Resposta		
		EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO
MFPA	via QUTIL	-0.010	-0.192	-0.001	-0.219	1.680	0.276
	via MSG	0.014	1.638	0.879	0.345	-1.776	-0.409
	TOTAL	0.857	-0.146	0.881	0.789	-0.201	0.568
	Efeito direto sobre	0.001	-0.069	-0.002	-0.239	0.012	-0.491
	Efeito indireto via TFPA	0.651	-0.732	0.000	0.393	-0.078	-0.383
	via TFG	-0.001	-0.048	0.000	-0.083	0.266	0.126
	via MSPA	-0.003	-0.115	0.004	0.517	-0.312	0.885
ICF	via ICF	0.001	-0.307	0.000	-0.170	0.086	0.259
	via QUTIL	-0.005	-0.091	0.000	-0.118	0.910	0.150
	via MSG	0.008	0.959	0.515	0.214	-1.105	-0.255
	TOTAL	0.653	-0.403	0.516	0.514	-0.221	0.291
	Efeito direto sobre	-0.003	0.611	0.001	0.317	-0.160	-0.485
	Efeito indireto via TFPA	-0.786	0.884	0.000	-0.447	0.088	0.436
	via TFG	-0.002	-0.133	0.000	-0.048	0.152	0.072
QUTIL	via MSPA	0.002	0.095	-0.003	-0.488	0.295	-0.836
	via MFPA	0.000	0.034	0.001	0.128	-0.006	0.263
	via QUTIL	0.011	0.208	0.001	0.258	-1.982	-0.326
	via MSG	-0.011	-1.322	-0.709	-0.284	1.462	0.337
	TOTAL	-0.788	0.379	-0.711	-0.564	-0.151	-0.539
	Efeito direto sobre	-0.014	-0.277	-0.001	-0.324	2.493	0.410
	Efeito indireto via TFPA	0.673	-0.757	0.000	0.314	-0.062	-0.306
	via TFG	0.002	0.166	0.001	0.123	-0.395	-0.187
	via MSPA	-0.002	-0.095	0.003	0.438	-0.264	0.750
	via MFPA	0.000	-0.022	-0.001	-0.087	0.004	-0.179
	via ICF	0.002	-0.460	0.000	-0.252	0.127	0.385
	via MSG	0.014	1.638	0.879	0.284	-1.466	-0.338

Tabela 4, continuação

Variáveis Explicativas	Variáveis Básicas					
	Eficiência			Resposta		
	EFA	EFUTIL	EFUSO	EFREC	EFISIO	EFAGRO
TOTAL	0.674	0.192	0.881	0.497	0.437	0.535
MSG Efeito direto sobre	0.015	1.859	0.998	0.367	-1.889	-0.435
Efeito indireto via TFPA	0.844	-0.950	0.000	0.496	-0.098	-0.483
via TFG	0.001	0.046	0.000	-0.057	0.183	0.086
via MSPA	-0.003	-0.121	0.004	0.611	-0.369	1.047
via MFPA	0.000	-0.035	-0.001	-0.140	0.007	-0.287
via ICF	0.002	-0.435	0.000	-0.245	0.124	0.375
via QUTIL	-0.013	-0.244	-0.001	-0.252	1.934	0.318
TOTAL	0.847	0.120	1.000	0.780	-0.108	0.620
Coefficiente de determinação =	1.000	0.921	1.000	0.703	0.873	0.457
Efeito da variável residual =	0.000	0.281	0.000	0.545	0.356	0.737

**SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SORGO EFICIENTES E
RESPONSIVAS À APLICAÇÃO DE FÓSFORO**

O artigo será enviado para o Periódico Científico Bragantia (Redigido
conforme normas da revista)

RESUMO - Os solos brasileiros possuem baixa fertilidade natural, são carentes de fósforo e com elevada acidez. Uma das estratégias é detectar e explorar a variabilidade existente entre os genótipos de sorgo para eficiência e resposta ao fósforo. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi selecionar linhagens de sorgo eficientes e responsivas com base em um conjunto de características e avaliar a classificação com base na produtividade. Foram avaliadas 36 linhagens no delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial simples, em dois níveis (com e sem adubação de fósforo). As características usadas para determinar a eficiência foram produtividade média, eficiência de absorção, utilização e uso sob condições de adubação adequada e sem adubação e, para resposta ao fósforo, foram avaliadas as características de produtividade relativa, eficiência de recuperação aparente, fisiológica e agrônômica. A h^2 variou de 97 a 41% sob condições de adubação e de 88 a 26% sob estresse nutricional, sendo essa diferença entre os níveis de 19%, em média.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*. Estresse nutricional. Índice de seleção. Parâmetros genéticos.

ABSTRACT - The Brazilian soils have low fertility, are lacking in phosphorus and high acidity. One strategy is to detect and exploit the variability among sorghum genotypes for efficiency and responsiveness. Thus, the objective of this work was to select lines of sorghum efficient and responsive to phosphorus with basis in a set of characteristics and evaluate the classification based on productivity. Thirty six sorghum lines were evaluated in factorial arrangement, with two levels (with and without fertilizer phosphorus). The characteristics used to determine efficiency were average productivity, efficiency of absorption, utilization and use under low and high conditions phosphorus availability, and for response to phosphorus, the characteristics were used; relative productivity, efficiency of apparent recovery, physiological utilization and agronomic utilization. The h^2 ranged 97-41% under conditions of normal P fertility and from 88 to 26% under P nutritional stress, with an average difference between the levels of 19%. The lines with the greatest effect responsive P9401, BR007B, BR008B, SC414 and SC566-12E and the most efficient under conditions of stress phosphorus are the lines ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 and BR012 (2B). The line SC566, ATF40B, BR007B, BR008B and P9401 showed the best performance simultaneously for different performance characteristics and response to P.

Keywords: *Sorghum bicolor*. Nutritional stress. Index selection. Genetic parameters.

1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros são carentes de fósforo (P), em consequência do material de origem e da forte interação do P com o solo (Raij et al., 2001), em que menos de 0,1% encontra-se em solução (Fardeau, 1996). Essas áreas possuem solos caracterizados pela baixa fertilidade natural, com elevada acidez e presença de Al^{+3} (Ernani et al., 2002). A alternativa empregada como forma de minimizar esse problema seria o uso de corretivos e fertilizantes, adequando o solo à planta. Entretanto, os fertilizantes inorgânicos de P provenientes de rochas de fosfato estarão esgotados dentro dos próximos 60 a 90 anos (Murrel e Fixen, 2006) e seu excesso polui cursos d'água e contribui para o processo de eutrofização (Withers et al., 2001).

Uma nova estratégia seria detectar e possivelmente explorar a variabilidade existente entre os genótipos de sorgo para eficiência e resposta ao P, reduzindo gastos com fertilizantes e adequando a planta ao solo (Good et al., 2004). A variabilidade entre espécies com relação à eficiência e resposta ao fósforo tem sido demonstrada por muitos trabalhos e em diversas culturas, como feijão (Oliveira et al., 1987), soja (Martinez et al., 1993a e 1993b), milho (Machado et al., 1999; Parentoni e Souza Junior, 2008), arroz (Furlani et al., 1984; Fageria, 1989), trigo (Abichequer e Bohlen, 1998; Horst et al., 1993) e sorgo (Wieneke, 1990; Schaffert et al., 2001). Essa diversidade constitui a base genética para programas de melhoramento e é decorrente de uma série de mecanismos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos desenvolvidos pelas plantas quando submetidas às condições adversas de fertilidade do solo, principalmente sob estresse de P.

O nível crítico externo pode ser definido como a quantidade necessária de nutriente no meio de cultivo para atingir determinada porcentagem do rendimento máximo (Blair, 1993). Diversas metodologias podem ser utilizadas

para determinação da eficiência e resposta ao P pelas plantas, salientando os que enfatizam a produtividade ou quantidade de nutriente absorvido. Sob o ponto de vista prático, os genótipos que produziram acima da média sob condições de baixo nível de fósforo e responderam bem ao incremento dos adubos fosfatados, são considerados eficientes e responsivos. Porém, a seleção com base em uma característica ou em poucas nem sempre é adequada para o melhorista, ou seja, a seleção simultânea de várias características oferece uma maior chance de sucesso e permite combinar múltiplas informações contidas na unidade experimental. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi selecionar linhagens de sorgo eficientes e responsivas com base em um conjunto de características e validar a classificação com base na produtividade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre os meses de fevereiro e julho de 2009, na área de fenotipagem de fósforo da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, MG, a uma altitude de 766,73.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema de fatorial simples, utilizando 36 linhagens elites do programa de Melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo em duas repetições, os quais foram avaliados em dois níveis de fósforo (P). As parcelas experimentais foram constituídas por duas linhas de 4 m, com espaçamento entre plantas de 0,15 m e entre linhas de 0,45 m.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens, para os dois ambientes. A adubação de semeadura foi realizada no sulco, de acordo com análise de solo, na qual no nível controle (adubação padrão) foram aplicados 190 kg ha^{-1} de superfosfato triplo, 100 kg ha^{-1} de cloreto de potássio e 67 kg ha^{-1} de uréia com o intuito de alcançar um nível de 35 mg dm^3 de P. No nível estresse (baixo P) não foi aplicado qualquer tipo de adubo fosfatado e 110 kg ha^{-1} de cloreto de potássio e 64 kg ha^{-1} de uréia.

As características usadas para medir a eficiência sob condições de estresse nutricional e adubação adequada foram os propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982). As características avaliadas foram produtividade média (PROD) obtidas pela pesagem dos grãos das três parcelas e transformadas em t ha^{-1} , eficiência de absorção (EFA) definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo à razão entre kg de P na planta e kg de P disponível no solo – kg kg^{-1} , conforme Tabela 1; eficiência de utilização (EFUTIL) definida como a capacidade do genótipo de utilizar o P absorvido pela planta para produzir grãos, correspondendo à razão entre kg de massa seca de grãos produzidos e kg de P na planta – kg kg^{-1} ; eficiência de uso

(EFUSO) definida como o produto entre a eficiência de absorção e utilização de P, correspondendo a kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo – kg kg^{-1} (Tabela 1).

Tabela 1 Principais atributos químicos do solo (0-20 cm de profundidade) após aplicação dos fertilizantes. Sete Lagoas, MG, 2010

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

Metodologias descritas em Embrapa (1999); mb - muito bom, b – bom, m – médio e mba – muito baixo

A resposta foi avaliada pelas características de produtividade relativa (PREL) definida como a diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse dividida pelo controle, multiplicado por 100 - %, eficiência fisiológica (EFISIO) definida pela diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse por unidade adicional de nutriente na planta entre ambientes – kg kg^{-1} ; eficiência de recuperação aparente (EFREC) definida como a capacidade do genótipo em recuperar o nutriente aplicado ao solo entre os ambientes controle e estresse, ou seja, diferença de produtividade entre os níveis dividida pela diferença de P no solo entre os ambientes – kg kg^{-1} (Tabela 1); eficiência agrônômica (EFAGRO) definida pela diferença de produtividade entre os níveis controle e estresse por kg de P aplicado – kg kg^{-1} (Tabela 1). Foram utilizados os índices propostos por Crasweel e Godwin (1984), nas quais utiliza as observações dos níveis controle e estresse em conjunto para avaliação da resposta a aplicação do P.

Para interpretação dos dados, inicialmente, realizou-se a análise de variância, o teste de agrupamento de Scott-Knott e estimaram-se os parâmetros genéticos utilizando o procedimento apresentado por Vencovsky e Barriga (1992), para cada uma das características, em cada nível e para a interação entre os níveis com o auxílio do programa computacional GENES (2010).

A classificação das linhagens quanto a eficiência e resposta ao P foi efetuada de acordo com a metodologia descrita por Fageria e Barbosa (1982), onde as linhagens que apresentam produtividades acima da média em ambientes sob baixos teores de P são consideradas eficientes e responsivas aquelas que estão acima da média de acordo com a seguinte expressão, $(\text{PROD adubado} - \text{PROD sem ad.})/(\text{diferença de P no solo entre o nível adubado e o sem})$. Posteriormente, as linhagens foram classificadas com base na soma de postos ou ranks (Mulamba e Mock, 1978), sendo classificadas com base em oito características para resposta e quatro para eficiência ao P.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de variância por nível, conjunta e interação entre os níveis (variáveis de resposta ao P), estão apresentados na Tabela 2. Para todos os caracteres avaliados, foram observadas diferenças significativas ($P \leq 0,05$) para a fonte de variação linhagens, exceto EFUSO em estresse nutricional e EFA para estresse e interação conjunta. Portanto, as linhagens apresentaram comportamentos diferentes para a maioria das características avaliadas, o que sugere a existência de variabilidade genética entre as linhagens de sorgo e diferenças entre os níveis avaliados.

É necessário enfatizar que o sucesso na avaliação da eficiência e resposta das linhagens é diretamente dependente da precisão experimental. No presente caso, a precisão foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV%) que variou de 10 a 35%, PROD em ambiente adubado e EFUSO na análise conjunta, respectivamente. Os resultados evidenciaram que houve boa precisão experimental, uma vez que os valores de CV ficaram dentro dos limites que são normalmente relatados em experimentos dessa natureza (Parentoni, 2008).

Tabela 2 Quadrado médio para linhagens (Q_{M_L}), coeficiente de variação experimental (CV), herdabilidade (h^2) e coeficiente de variação genética (CV_g) nos dois níveis de fósforo, conjunta e na interação entre níveis em sorgo granífero. UFLA, Lavras, MG, 2010

ESTIMATIVAS	NÍVEL CONTROLE			
	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO
Q_{M_L}	3,92**	0,02*	3624,28**	166,26*
CV (%)	9,96	13,46	11,66	22,40
h^2	89,06	80,97	96,93	40,99
CV _g	30,17	29,97	66,89	21,38
ESTRESSE NUTRICIONAL				
	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO
Q_{M_L}	1,66**	0,36 ^{n.s}	9481,44**	2945,96 ^{n.s}
CV (%)	18,39	35,50	18,51	31,19
h^2	60,76	58,20	87,62	26,34
CV _g	25,20	48,27	48,20	21,81
CONJUNTA				
	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO
Q_{M_L}	3,81 ^{n.s}	0,68 ^{n.s}	2454,43*	184,52*
$Q_{M_{L \times N}}$	1,88**	0,21 ^{n.s}	3855,96**	175,58*
CV (%)	11,75	10,05	10,05	35,51
h^2	52,02	71,07	85,54	15,83
CV _g	22,27	25,78	62,03	7,44
RESPOSTA AO P				
	PREL	EFREC	EFISIO	EFAGRO
Q_{M_L}	0,05*	0,01*	0,22*	153,82**
CV (%)	19,57	21,30	19,52	24,04
h^2	87,03	59,15	17,49	89,33
CV _g	52,50	27,36	9,12	71,99

* e ** - significativo a 5% e 1% de probabilidade, pelo teste F; ^{n.s} – não significativo

A variabilidade entre as linhagens pode ser confirmada pelas estimativas da herdabilidade (h^2). A h^2 é um dos parâmetros genéticos mais importantes para o trabalho do melhorista, pois, possui um papel preditivo expressando a confiança do valor fenotípico como indicador do valor reprodutivo. Entre as características, a h^2 variou de 97%, em EFUTIL no ambiente adubado, a 15%

em EFUSO na análise conjunta (Tabela 2). É frequentemente relatado que as estimativas de h^2 são menores nos ambientes com estresse, sendo que essa diferença entre os níveis foi de 19%, em média. Isso ocorre devido à menor precisão experimental e corrobora com diversos trabalhos (Brancourt-humel et al., 2005). Outro indicador do potencial genético é o coeficiente de variação genética (CV_g). Os valores refletem a boa variação dos genótipos, sendo mais relevantes nas características EFUTIL (67%) no nível controle, em EFA sob condições de estresse e em EFAGRO (72%), com exceção de EFISIO e EFUSO, em estresse, todas as características tiveram valores acima de 21%.

A produtividade, em ambientes adubados com P, demonstrou ser um bom indicativo para classificar as linhagens, pois, houve alta coincidência com a classificação (CI) proposta por Fageria e Barbosa Filho (1982). Observa-se na Tabela 3, que todas as linhagens responsivas estão agrupadas entre os grupos “a” e “c”, exceto as linhagens TX644B, ATF53B que estão agrupadas em “d” e ATF13B, em “e”. Vale ressaltar que a produtividade média das linhagens responsivas é quase duas vezes maior que das não-responsivas, confirmando que há um maior efeito da aplicação fosfatada sobre as responsivas.

Com relação à eficiência de absorção (EFA), as linhagens que estão agrupadas em “d” e “e” foram as que tiveram desempenho abaixo da média geral. Destaque para a linhagem ATF 40 que apresentou valor 0,24 kg kg⁻¹ acima da média das responsivas e 0,34 kg kg⁻¹ acima da média das não-responsivas (Tabela 3).

Nota-se que 21 linhagens estão acima da média geral para EFUTIL (grupos “a, b e c”), variando de 432 a 33 kg kg⁻¹. Observou-se um alto valor para a linhagem ATF54 (f240), na qual apresentou valores quase quatro vezes maiores que o das linhagens responsivas (Tabela 3).

Dessa forma, maior atenção deve ser dada a esta linhagem que alcançou patamares extraordinários e necessitando de estudos mais detalhados para a

avaliação do seu mecanismo de utilização de P. Fato interessante, é que existe diferença entre os mecanismos de absorção e utilização mesmo dentro da mesma espécie e que podem ser encontradas linhagens com mecanismos fisiológicos, biológicos e/ou químicos mais adaptados a condições de estresse entre as cultivares, como foi visto em trigo e em outras culturas (Ozturk et al., 2005).

A característica de eficiência de uso (EFUSO) não discriminou bem os genótipos e apenas dez linhagens apresentaram comportamento acima da média geral (grupo “a”). Destaque para as linhagens BR008B, que obteve média alta para PROD, EFA e EFUSO, e SC566, que apresentou altos valores para PROD, EFUTIL e EFUSO (Tabela 3).

Segundo Clark e Duncan (1991), de forma geral, o conceito de eficiência nutricional em plantas, indica aquelas capazes de produzir melhor (matéria seca de parte aérea ou grãos), num dado nível de nutriente no solo. Dessa forma, plantas que produziram uma maior quantidade de grãos, sob uma determinada condição de estresse, serão mais eficientes. A produtividade das linhagens eficientes foi 1,1 tonelada maior que a das ineficientes (Tabela 4).

Tabela 3 Produtividade (PROD), classificação das linhagens com base na produtividade (CI), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO) sob condições de adubação normal em sorgo granífero. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2010

Linhagens	NÍVEL CONTROLE								
	PROD	CI	EFA	EFUTIL	EFUSO				
	t ha ⁻¹			kg kg ⁻¹					
ARG1	3,51	c	R	0,29	d	103,99	c	30,15	b
ATF13B	2,46	e	R	0,24	d	87,50	c	21,25	b
ATF14B	2,30	e	NR	0,28	d	70,34	d	19,81	b
ATF40B	5,31	a	R	0,62	a	73,47	d	45,42	a
ATF53B	2,88	d	R	0,25	d	96,93	c	24,65	b
ATF54 (f186)	4,10	c	R	0,34	c	100,48	c	34,52	a
ATF54 (f206)	3,90	c	R	0,29	d	111,53	c	31,95	b
ATF54 (f240)	4,50	b	R	0,08	e	432,31	a	36,69	a
ATF54 (f596)	3,97	c	R	0,44	b	75,08	d	33,12	a
ATF54 (f61)	3,47	c	R	0,24	d	122,27	b	29,52	b
ATF54 (f64)	3,66	c	R	0,39	c	79,32	d	30,58	b
ATF54B	2,92	d	NR	0,17	e	149,28	b	24,90	b
BR 005R	2,89	d	NR	0,22	d	110,75	c	24,85	b
BR 007B	5,43	a	R	0,41	c	111,31	c	45,86	a
BR 008B	5,50	a	R	0,52	b	89,76	c	46,78	a
BR 012R	2,35	e	NR	0,30	d	67,91	d	20,25	b
BR012 (1B)	1,78	f	NR	0,46	b	33,36	d	15,43	b
BR012 (2B)	2,57	e	NR	0,34	c	65,31	d	21,94	b
BR012 (R6)	2,43	e	NR	0,35	c	59,01	d	20,69	b
BTX623	2,44	e	NR	0,29	d	71,25	d	20,99	b
CMSXS110	3,13	d	NR	0,37	c	72,86	d	26,81	b
CMSXS136	3,30	d	NR	0,26	d	106,64	c	28,15	b
CMSXS180R	3,87	c	NR	0,34	c	93,01	c	31,17	b
CMSXS225	3,06	d	NR	0,40	c	63,53	d	25,32	b
CMSXS226	3,13	d	NR	0,28	d	95,92	c	26,68	b
CMSXS227	1,83	f	NR	0,23	d	69,06	d	15,56	b
IS3620C	2,09	e	NR	0,21	d	83,53	c	17,84	b
P9401	5,39	a	R	0,47	b	97,78	c	45,63	a
P9405	3,42	d	NR	0,51	b	56,42	d	28,87	b
QL3	4,49	b	R	0,42	c	88,90	c	37,56	a
SC414-12E	4,71	b	R	0,34	c	117,81	b	39,76	a

Tabela 3, continuação

Linhagens	PROD	CI	NÍVEL CONTROLE		
			EFA	EFUTIL	EFUSO
SC566	5,45 a	R	0,36 c	129,05 b	46,22 a
Tx643 B	1,52 f	NR	0,15 e	84,55 c	12,87 b
Tx644 B	3,29 d	R	0,22 d	122,99 b	27,67 b
Tx645 B	1,75 f	NR	0,25 d	59,66 d	15,00 b
TX7078R	3,66 c	R	0,47 b	66,29 d	31,21 b
médias	3,40		0,33	97,75	28,77
médias Responsivos	4,37		0,38	114,63	36,76
médias Não Responsivos	2,53		0,28	82,65	21,61

R- responsivos; NR – não-responsivos; Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Porém, de acordo com a proposta de classificação, 16 linhagens seriam eficientes, porém, o agrupamento indicaria somente oito como eficientes (grupos “a” e “b”). A linhagem ATF40 obteve alta produtividade, independente do nível de fósforo no solo, sendo considerada estável, entretanto, a linhagem BR005R teve baixa produtividade sob condições adequadas de adubação e foi altamente eficiente na deficiência de fósforo. Indicando que a linhagem ATF40 pode ser indicada para os dois níveis de fósforo e a BR005R somente para o deficiente, confirmado pela significância da interação da análise conjunta.

Para as características EFA e EFUSO não houve diferença significativa, indicando que as linhagens se comportaram da mesma forma sob condições de estresse nutricional de P. Com relação à análise conjunta, a características EFA pode ser medida em ambientes com adubação adequada, tendo em vista que foi detectada diferença entre as linhagens em ambientes adubados, mas que não existe diferença entre os níveis. Porém, para a característica EFUSO, pode se utilizar outros critérios como a eficiência de utilização e produtividade para avaliar a maior eficiência e descartar EFUSO como critério de seleção.

As linhagens que apresentaram maior EFUTIL foram linhagens que apresentaram baixos valores para PROD, com exceção de BR005R, o que dificulta a seleção de linhagens que possuam estas características em conjunto. A linhagem ATF54 (f240) apresentou alto desempenho para EFUTIL, independente do nível em que foi avaliada, indicando que a planta tem alta capacidade em produzir grãos apesar de sua baixa capacidade de absorver P (Tabela 4).

A produtividade relativa (PREL) é uma característica que está intimamente ligada à resposta e verifica-se que linhagens que apresentaram valores acima da média geral, são responsivas, exceto TX645B que foi classificada como não-responsiva (Tabela 5).

Tabela 4 Produtividade (PROD), classificação das linhagens com base na produtividade- (CI), eficiência de absorção (EFA), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO) sob condições de estresse nutricional em sorgo granífero. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2010

Linhagens	ESTRESSE NUTRICIONAL									
	PROD	CI	EFA	EFUTIL	EFUSO					
BR005R	3,97	a	E	0,80	a	383,32	b	305,43	a	
ATF40B	3,77	a	E	1,54	a	186,08	d	287,35	a	
SC566	3,27	b	E	1,27	a	199,18	d	253,33	a	
CMSXS225	2,95	b	E	0,99	a	221,77	c	219,50	a	
BR012 (R6)	2,90	b	E	0,80	a	275,21	c	221,37	a	
BR012 (1B)	2,77	b	E	1,28	a	168,28	d	215,90	a	
CMSXS180R	2,76	b	E	1,22	a	169,62	d	206,71	a	
P9405	2,69	b	E	1,03	a	199,79	d	205,55	a	
CMSXS136	2,33	c	E	1,42	a	114,11	d	161,88	a	
ATF54 (f596)	2,27	c	E	2,63	a	66,50	d	175,02	a	
BR012 (2B)	2,27	c	E	0,91	a	191,51	d	174,58	a	
CMSXS226	2,15	c	E	1,12	a	141,64	d	158,77	a	
ATF54 (f61)	2,14	c	E	0,53	a	309,94	c	164,90	a	
QL3	2,13	c	E	1,05	a	154,50	d	161,86	a	

Tabela 4, continuação

Linhagens	ESTRESSE NUTRICIONAL								
	PROD	CI	EFA	EFUTIL	EFUSO				
ATF54B	2,10	c	E	1,08	a	150,99	d	163,17	a
CMSXS110	2,08	c	E	0,99	a	162,38	d	160,65	a
ATF54 (f206)	1,95	c	I	1,04	a	144,10	d	149,90	a
ATF54 (f186)	1,94	c	I	1,90	a	77,07	d	146,30	a
BR008B	1,92	c	I	1,20	a	123,93	d	148,64	a
TX7078R	1,92	c	I	0,59	a	252,09	c	147,53	a
BR007B	1,90	c	I	0,91	a	161,87	d	147,01	a
TX644B	1,90	c	I	0,67	a	219,52	c	146,46	a
SC414-12E	1,88	c	I	0,79	a	184,45	d	145,30	a
BR012R	1,86	c	I	0,88	a	149,65	d	131,74	a
ATF54 (f64)	1,66	c	I	1,27	a	100,43	d	127,68	a
BTX623	1,62	d	I	0,88	a	143,45	d	125,73	a
ATF14B	1,49	d	I	0,41	a	281,24	c	115,22	a
CMSXS227	1,41	d	I	0,74	a	142,70	d	106,03	a
TX643B	1,40	d	I	0,67	a	151,50	d	102,05	a
IS3620C	1,39	d	I	0,62	a	172,89	d	107,60	a
ARG1	1,28	d	I	0,53	a	187,83	d	98,83	a
ATF54 (f240)	1,22	d	I	0,17	a	555,65	a	94,05	a
P9401	1,16	d	I	0,43	a	209,77	c	89,91	a
ATF13B	0,96	d	I	0,17	a	430,08	b	74,75	a
ATF53B	0,91	d	I	0,26	a	271,59	c	71,06	a
TX645B	0,81	d	I	0,40	a	156,31	d	63,11	a
médias	2,03			0,92		200,30		154,86	
médias									
Ineficiente	1,53			0,73		205,81		116,95	
médias									
Eficiente	2,66			1,17		193,43		202,25	

E- eficientes; I – ineficientes; Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott, a 5% de probabilidade

É importante salientar que a média das linhagens IR foi 19% superior a médias das linhagens ER. Isso ocorreu devido à drástica redução da PROD entre os níveis controle e estresse, onde a redução média entre as ineficientes foi de 2,5 t ha⁻¹ e nas eficientes foi de apenas 1,8t ha⁻¹.

A eficiência de recuperação aparente (EFREC) mede a quantidade de nutriente acumulado por unidade de nutriente aplicado, ou seja, mede a quantidade de P que se acumulou na parte aérea da planta em decorrência da aplicação de P no solo.

As linhagens P9401, TX7078R, P9405 e BR008B apresentaram maior recuperação de P (grupo “a”), entretanto, a diferença entre os grupos R e NR foi de apenas 0,13 kg kg⁻¹. A média geral das linhagens foi de 0,25 kg kg⁻¹, indicando que há uma diferença média de 25 kg de P na planta para cada cem kg de P à mais aplicado entre os níveis controle e estresse. Outra forma de reportar este valor seria que, em média, 25 kg de P entre os níveis controle e estresse foram recuperados pela planta de sorgo.

Com relação à eficiência fisiológica (EFISIO), somente oito linhagens não estavam agrupadas entre as de melhor desempenho (grupos “b” e “c”), de acordo com a Tabela 5. Esta característica mede a quantidade de grãos produzida por unidade adicional de P no interior da planta entre os níveis controle e estresse, na qual as linhagens classificadas como ER e IR apresentaram média acima das linhagens ENR e INR. Isso demonstrou que a classificação das linhagens concordou com o que era esperado, onde linhagens com maior EFISIO seriam as com maior efeito responsivo. A característica variou de 0,32 (P9405) a 2,19 kg kg⁻¹ (BR005R), indicando que 219 kg de massa seca de grãos foram produzidos pela linhagem BR005R para cada kg de P na planta entre os níveis controle e estresse.

Tabela 5 Produtividade (PROD), classificação das linhagens com base na produtividade (CI), produtividade relativa (PREL), eficiência de recuperação aparente (EFREC), eficiência de fisiológica (EFISIO), eficiência agrônômica (EFAGRO) utilizando-se das observações provenientes dos dois níveis de fósforo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2010

Linhagens	CI	RESPOSTA			
		PREL %	EFREC	EFISIO kg kg ⁻¹	EFAGRO
BR012 (R6)	ENR	0,40 d	0,30 b	1,52 a	0,90 e
BR012 (1B)	ENR	0,10 d	0,36 b	1,49 a	0,06 e
BR012 (2B)	ENR	11,60 d	0,27 b	1,71 a	3,21 e
ATF54B	ENR	36,80 c	0,22 b	1,66 a	15,33 d
BR 005R	ENR	0,20 d	0,16 c	2,19 a	11,55 d
CMSXS110	ENR	33,40 c	0,29 b	1,20 b	11,23 d
CMSXS136	ENR	33,20 c	0,13 c	0,57 c	4,39 e
CMSXS225	ENR	3,50 d	0,33 b	1,99 a	1,14 e
CMSXS226	ENR	31,50 c	0,18 c	1,33 a	10,62 d
P9405	ENR	21,40 c	0,45 a	0,32 c	7,87 e
ATF40B	ER	40,10 c	0,30 b	1,81 a	14,16 d
ATF54 (f596)	ER	42,80 c	0,17 c	0,86 c	18,31 d
ATF54 (f61)	ER	38,40 c	0,21 c	1,67 a	14,34 d
CMSXS180R	ER	28,60 c	0,23 b	1,25 b	11,92 d
QL3	ER	52,60 b	0,35 b	1,62 a	25,43 c
SC566	ER	40,00 c	0,25 b	1,64 a	23,45 c
ATF14B	INR	35,20 c	0,27 b	1,36 a	8,71 e
BR 012R	INR	20,80 c	0,23 b	0,76 c	5,25 e
BTX623	INR	33,90 c	0,22 b	1,23 b	8,90 e

Tabela 5, continuação

Linhasgens	CI	PREL	RESPOSTA		
			EFREC	EFISIO	EFAGRO
				kg kg ⁻¹	
		%			
CMSXS227	INR	23,20 c	0,16 c	0,99 b	4,57 e
IS3620C	INR	33,40 c	0,16 c	1,38 a	7,49 e
Tx643 B	INR	7,70 d	0,09 c	2,05 a	1,26 e
Tx645 B	INR	53,60 b	0,23 b	1,50 a	10,11 d
ARG1	IR	63,60 a	0,26 b	1,83 a	23,97 c
ATF13B	IR	60,90 a	0,25 b	1,76 a	16,11 d
ATF53B	IR	68,30 a	0,25 b	1,85 a	21,18 c
ATF54 (f186)	IR	52,80 b	0,15 c	1,59 a	23,28 c
ATF54 (f206)	IR	50,00 b	0,20 c	1,73 a	21,01 c
ATF54 (f240)	IR	72,90 a	0,08 c	1,59 a	35,28 b
ATF54 (f64)	IR	54,80 b	0,28 b	1,55 a	21,55 c
BR 007B	IR	65,10 a	0,38 b	1,87 a	37,99 b
BR 008B	IR	65,20 a	0,44 a	1,72 a	38,59 b
P9401	IR	78,40 a	0,47 a	1,91 a	45,40 a
SC414-12E	IR	60,20 a	0,28 b	1,86 a	30,52 b
Tx644 B	IR	42,10 c	0,14 c	1,69 a	14,89 d
TX7078R	IR	47,50 b	0,46 a	1,46 a	18,68 d
médias		38,72	0,25	1,56	15,63
médias ER		40,42	0,25	1,48	17,93
médias ENR		17,21	0,27	1,40	6,63
médias IR		59,85	0,28	1,72	26,80
médias INR		29,69	0,19	1,32	6,61

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Para a característica EFAGRO, as linhagens P9401, BR008B, BR007B, ATF (f240) e SC414-12E obtiveram melhor desempenho e com valor duas vezes maior que média geral. O valor médio obtido pela linhagem P9401 indica que para cada kg de P disponível no solo entre os níveis controle e estresse foram produzidos 45,4 kg de massa seca de grãos, variando de 45 a 0,06 kg kg⁻¹.

De acordo com a soma de postos, as cinco linhagens mais indicadas para condições de adubação de P são P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E e SC566. Podendo-se inferir que essas linhagens apresentam melhor desempenho, simultaneamente, envolvendo as características de eficiência sob condições de adubação adequada e resposta ao P. É importante relatar que a classificação proposta por Fageria e Barbosa (1982), apesar de simples, é extremamente eficiente em classificar as linhagens como responsivas, considerando que houve coincidência de 94% do rank com a classificação. O método do índice de seleção baseado na soma de postos facilita a decisão do melhorista sobre quais linhagens devem ser selecionadas e quais devem ser descartadas. Entre as linhagens com baixo desempenho para resposta estão às linhagens CMSXS227, TX643B, IS3620C, BR012R e BR012 (1B), conforme Tabela 6.

Houve concordância, também, de 97% para a classificação das linhagens sob condições de estresse nutricional, confirmando que a metodologia proposta para classificação com base nos dados de produtividade é um excelente método e possui a vantagem de diminuir o tempo e os gastos com análises laboratoriais em fases iniciais de seleção. As mais eficientes sob condições de estresse de P foram as linhagens ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 e BR012 (2B) e as menos eficientes foram TX645B, CMSXS227, ATF53B, TX643B e P9401 (Tabela 7).

Tabela 6 Nova classificação das linhagens de sorgo com base na soma de postos (NCI) envolvendo quatro características avaliadas em condições adubadas (nível controle) e quatro avaliadas pela interação entre os níveis para obtenção da resposta. Embrapa Milho e Sorgo, Sete lagoas, MG, 2010

Linhagens	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO	PREL	EFREC	EFISIO	EFAGRO	Soma	NCI
ARG1	15	21	11	15	6	16	8	7	99	R
ATF13B	27	29	19	27	7	18	10	15	152	NR
ATF14B	31	24	27	31	21	14	27	26	201	NR
ATF40B	5	1	24	5	17	9	9	19	89	R
ATF53B	25	27	14	25	3	17	7	11	129	R
ATF54 (f186)	9	16	12	9	11	32	19	9	117	R
ATF54 (f206)	11	20	7	11	13	26	11	12	111	R
ATF54 (f240)	7	36	1	8	2	36	20	4	114	R
ATF54 (f596)	10	7	23	10	15	28	33	14	140	R
ATF54 (f61)	16	28	5	16	19	25	15	18	142	R
ATF54 (f64)	13	11	22	14	9	13	21	10	113	R
ATF54B	23	34	2	23	20	24	16	16	158	NR
BR 005R	24	31	9	24	35	31	1	21	176	NR
BR 007B	3	9	8	3	5	5	5	3	41	R
BR 008B	1	2	17	1	4	4	12	2	43	R
BR 012R	30	19	29	30	30	22	34	29	223	NR
BR012 (1B)	34	6	36	34	36	6	24	36	212	NR
BR012 (2B)	26	18	31	26	31	15	13	32	192	NR
BR012 (R6)	29	14	34	29	34	10	22	35	207	NR
BTX623	28	22	26	28	22	23	30	25	204	NR

Tabela 6, continuação

Linhagens	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO	PREL	EFREC	EFISIO	EFAGRO	Soma	NCI
CMSXS110	21	12	25	20	23	11	31	22	165	NR
CMSXS136	18	25	10	18	25	34	35	31	196	NR
CMSXS180R	12	17	16	13	27	21	29	20	155	NR
CMSXS225	22	10	32	22	33	8	3	34	164	NR
CMSXS226	20	23	15	21	26	27	28	23	183	NR
CMSXS227	33	30	28	33	28	30	32	30	244	NR
IS3620C	32	33	21	32	24	29	26	28	225	NR
P9401	4	5	13	4	1	1	4	1	33	R
P9405	17	3	35	17	29	3	36	27	167	NR
QL3	8	8	18	7	12	7	18	6	84	R
SC414-12E	6	15	6	6	8	12	6	5	64	R
SC566	2	13	3	2	18	19	17	8	82	R
Tx643 B	36	35	20	36	32	35	2	33	229	NR
Tx644 B	19	32	4	19	16	33	14	17	154	NR
Tx645 B	35	26	33	35	10	20	23	24	206	NR
TX7078R	14	4	30	12	14	2	25	13	114	R

Tabela 7 Nova classificação das linhagens de sorgo com base na soma de postos (NCI) envolvendo quatro características avaliadas em condições de estresse nutricional. Embrapa Milho e Sorgo, Sete lagoas, MG, 2010

Linhagens	PROD	EFA	EFUTIL	EFUSO	Soma	NCI
ARG1	31	29	15	31	106	I
ATF13B	34	35	2	34	105	I
ATF14B	27	32	5	27	91	I
ATF40B	2	3	16	2	23	E
ATF53B	35	34	7	35	111	I
ATF54 (f186)	18	2	35	22	77	I
ATF54 (f206)	17	13	28	17	75	I
ATF54 (f240)	32	36	1	32	101	I
ATF54 (f596)	10	1	36	9	56	E
ATF54 (f61)	13	30	4	11	58	E
ATF54 (f64)	25	6	34	25	90	I
ATF54B	15	11	26	12	64	E
BR005R	1	22	3	1	27	E
BR007B	21	17	22	20	80	I
BR008B	19	9	32	18	78	I
BR012 (1B)	6	5	20	6	37	E
BR012 (2B)	11	18	14	10	53	E
BR012 (R6)	5	21	6	4	36	E
BR012R	24	20	27	24	95	I
BTX623	26	19	29	26	100	I
CMSXS110	16	15	21	15	67	E
CMSXS136	9	4	33	13	59	E
CMSXS180R	7	8	19	7	41	E
CMSXS225	4	16	9	5	34	E
CMSXS226	12	10	31	16	69	E
CMSXS227	28	24	30	29	111	I
IS3620C	30	27	18	28	103	I
P9401	33	31	11	33	108	I
P9405	8	14	12	8	42	E
QL3	14	12	24	14	64	E
SC414-12E	23	23	17	23	86	I
SC566	3	7	13	3	26	E
TX643B	29	25	25	30	109	I
TX644B	22	26	10	21	79	I
TX645B	36	33	23	36	128	I
TX7078R	20	28	8	19	75	I

Com o intuito de selecionar progênies superiores para a efetiva concentração de alelos favoráveis, Santos et al (2007) avaliaram 192 progênies de milho pipoca empregando os índices de seleção de Smith e Hazel, Pesek e Baker, Williams, e Mulamba e Mock. O índice de seleção baseado na soma de postos de Mulamba e Mock proporcionou as magnitudes mais elevadas de ganhos preditos para a maioria das características, incluindo-se a capacidade de expansão e produção.

A classificação pela soma de postos indicou que as cinco linhagens que obtiveram baixo desempenho de forma simultânea para as características de eficiência e resposta foram CMSXS227, TX643B, TX645B, IS3620C e BTX623 e com melhor desempenho as linhagens SC566, ATF40B, BR007B, BR008B e P9401.

Verifica-se que 30,5% das linhagens foram classificadas como IR, 25% INR, 30,5% ENR e 14% ER (Tabela 7). Houve 94% de coincidência com a classificação feita apenas com base na produtividade, onde a linhagem TX7078R, classificada como IR, passou para a classe ER (Tabela 8). Porém, entre dez linhagens melhor classificadas pela soma de postos envolvendo eficiência e resposta, somente três foram classificadas como ER.

Deve-se ressaltar que há um número expressivo de linhagens que se enquadram dentro dos padrões desejados pelos melhoristas para condições de estresse e resposta ao fósforo. Ou seja, obter linhagens que apresentam elevada produtividade de grãos em ambientes sob baixos teores de P, mas que também seja responsiva a melhoria do ambiente, ou seja, classificação ER (Tabela 8).

As linhagens SC566, ATF40B, BR007B, BR008B e P9401 foram as que obtiveram melhor classificação pela soma dos postos envolvendo os níveis controle e estresse, sendo as melhores linhagens eficientes e responsivas utilizando o índice proposto por Mulamba e Mock, porém, classificadas com ER, ER, IR, IR e IR, respectivamente (Tabelas 8).

Tabela 8 Classificação final (Clf) das linhagens de sorgo, com base na soma de postos envolvendo os níveis controle e estresse. Embrapa Milho e Sorgo, Sete lagoas, MG

Linhagens	Soma T	NCI	Linhagens	Soma T	NCI
CMSXS180R	196	ENR	ATF14B	292	INR
CMSXS225	198	ENR	BR012R	302	INR
BR005R	203	ENR	BTX623	304	INR
P9405	209	ENR	IS3620C	328	INR
ATF54B	222	ENR	TX645B	334	INR
BR012 (R6)	228	ENR	TX643B	338	INR
CMSXS110	232	ENR	CMSXS227	355	INR
CMSXS226	252	ENR	BR007B	121	IR
CMSXS136	255	ENR	BR008B	121	IR
BR012 (1B)	260	ENR	P9401	141	IR
BR012 (2B)	265	ENR	SC414-12E	150	IR
SC566	108	ER	ATF54 (f206)	186	IR
ATF40B	112	ER	TX7078R	189	IR
QL3	148	ER	ATF54 (f186)	194	IR
ATF54 (f596)	196	ER	ATF54 (f64)	203	IR
ATF54 (f61)	200	ER	ARG1	205	IR
TX644B	233	INR	ATF54 (f240)	215	IR
ATF13B	257	INR	ATF53B	240	IR

4 CONCLUSÕES

As linhagens com maior efeito responsivo são P9401, BR007B, BR008B, SC414-12E e SC566 e as mais eficientes sob condições de estresse de fósforo são as linhagens ATF40B, SC566, BR005R, CMSXS225 e BR012 (2B).

As linhagens SC566, ATF40B, BR007B, BR008B e P9401 foram as que apresentaram melhor desempenho de forma simultânea para diferentes características de eficiência e resposta ao P.

A classificação com base na produtividade é um excelente método de identificação de linhagens eficientes e responsivas.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.1, p.21-25, 1998.
- BLAIR, G. Nutrient efficiency what do we really mean? In: RANDALL, P.J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R.A.; MUNNS, R. (Eds.). **Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p.205– 213. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50)
- BRANCOURT-HULMEL, M.; HEUMEZ.E.; PLUCHARD,P. BEGHIN,D.; DEPATUREAUX,C.; GIRAUD,A.; LE GOUIS, J. Indirect versus direct selection of winter wheat for low-input or high-inputs levels. **Crop Science**, Madison, v.45, n.4, p.1427-1431, July/aug. 2005.
- CLARK, R.B.; DUNCAN, R.R. Improvement of plant mineral nutrition through breeding **Field Crops Research**, Amsterdam, 27, p. 219-240, 1991.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. Programa Genes. Aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa. MG: UFV, 2010.
- ERNANI, P.R. et al. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, n.2, p.305-309, 2002.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Phosphorus-use efficiency by corn genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, New York, **20**(10):1267-1277, 1997.
- FAGERIA, N.K. Rice cultivars response to phosphorus nutrient solution. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.6, p.699-702, 1989.
- FAGERIA,N.K.; BARBOSA FILHO, M.P. Avaliação preliminar de cultivares de arroz irrigado para maior eficiência de utilização de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.17, n.12, p1709-1712, dez., 1982.
- FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. **Fertility Research**, v.45, p.91-100, 1996.

FURLANI, A.M.C. et al. Avaliação de genótipos de arroz quanto à eficiência na utilização de fósforo em solução nutritiva e em solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.3, p.291-302, 1984.

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

GRAHAM, R.D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P.B.; LAUCHI, A., ed. **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p.57-102.

HORST, W.J. *et al.* Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. In: Barrow, N.J. (ed.). **Plant nutrition – from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 367-370, 1993.

MACHADO, C.T. de T. et al. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, v.58, p.109-124, 1999.

MARTINEZ, H.E.P. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.2, p.239-244, 1993a.

MARTINEZ, H.E.P. et al. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo: I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.2, p.231-238, 1993b.

MURREL, T. S.; FIXEN, P. E. Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 150-151.

OLIVEIRA, I.P et al. Avaliação de cultivares de feijão quanto à eficiência no uso do fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.1, p.39-45, 1987.

OZTURK,L.; EKER,S.; TORUN, B.; CAKMAK, I. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and Soil** (2005) 269: 69–80.

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

PARENTONI, S.N.; SOUZA JÚNIOR, C.L. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.43, n.7, p.893-901, jul. 2008.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

SANTOS, F.S.; AMARAL JÚNIOR, A.T.; FREITAS JÚNIOR, S.P.; RANGEL, R.M.; PEREIRA, M.G. Predição de ganhos genéticos por índice de seleção BA população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente. *Bragantia*, Campinas, v.66, n.3, p.389-396, 2007.

SCHAFFERT, R. E. ALVES, V.M.C., PITTA, G.V.E., BAHIA FILHO, A.F.C., SANTOS, F.G. **Genetic variability in sorghum for efficiency and responsiveness**. In: *Plant Nutrition – Food Security and Sustainability of Agroecosystems*, p. 72-73, 2001, Kluwer, Academic Publisher. Netherlands.

SILVA, A.E. da & GABELMAN, W.H. Screening maize inbred lines for tolerance to low-P stress condition. *Plant and Soil*, Dordrecht, **146**(1-2):181-187, 1992.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Plant Soil*, Dordrecht, v.23, p.139-145, 1990.

WITHERS PJA, EDWARDS AC, FOY RH. **Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil**. *Soil Use and Management* 17: 139–149. 2001.