

FREDERICO DELLANO SOUZA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA QUANTO À EFICIÊNCIA DE USO
DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

RIO PARANAÍBA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba

T

S586c
2016 Silva, Frederico Dellano Souza, 2016-
Caracterização de genótipos de soja quanto à eficiência de uso de
fósforo / Frederico Dellano Souza Silva. - Rio Paranaíba, MG, 2016.
vii, 20f : il. ; 29 cm.

Orientador: Pedro Ivo Vieira Good God.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.18-20.

1. *Glycine max*. 2. Eficiências de absorção e de utilização.
3. Estresse abiótico. I. Universidade Federal de Viçosa. Campus UFV -
Rio Paranaíba. Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal (campus
CRP). II. Título.

FREDERICO DELLANO SOUZA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA QUANTO À EFICIÊNCIA DE USO
DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 01 de setembro de 2016.

Prof. Vinícius Ribeiro Faria
(Coorientador)

Prof. Roberto Ferreira Novais
(Coorientador)

Prof. Hernani Martins Júnior

Prof. Pedro Ivo Vieira Good God
(Orientador)

Ao Espírito Santo de Deus, meu melhor amigo.
Aos meus pais, Valdomiro Laurêncio da Silva e Maria de Fátima Souza Silva.
Aos meus irmãos, Francêscle Vallone Souza Laurêncio e Fayra Duanne Souza Silva.
Aos meus avós (in memoriam), Ilídio Pereira de Souza e Clotildes de Souza Cangussu.
Em especial à minha esposa, Melina Elisa Alves Silva. Teu amor é minha energia, meu motor.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela benção de concluir a Pós-Graduação em Agronomia, pelo Seu carinho e amor incondicional.

À Universidade Federal de Viçosa - *Campus* Rio Paranaíba e aos professores da Pós-Graduação em Agronomia pois “se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” (Isaac Newton).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo durante a realização deste curso.

Ao professor e orientador Dr. Pedro Ivo Vieira Good God pela oportunidade, paciência e confiança concedida. Agradeço pela transmissão de conhecimentos que edificaram a minha vida pessoal e profissional. Levarei o seu ensino e orientação por toda a vida.

Aos professores e coorientadores Dr. Vinícius Ribeiro Faria e Ph.D. Roberto Ferreira Novais pela ajuda, paciência e orientações que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Hernani Martins Júnior pela participação na banca de defesa de dissertação e contribuições dadas que certamente auxiliaram no aprimoramento deste trabalho.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Genética e Melhoramento de Plantas (LGEM) pelo apoio e grandes contribuições no decorrer deste curso.

Aos técnicos e funcionários da Universidade Federal de Viçosa - *Campus* Rio Paranaíba pela ajuda e serviços prestados que me auxiliaram durante o curso.

Aos meus pais, irmãos e familiares, pelo apoio, investimento, credibilidade e amor.

À minha querida esposa Mel, pelo incentivo constante, pela companhia e amor. Eu sei que sem você, isso não seria possível.

Aos meus pastores, Pr. Luiz e Pra. Eliane pelas orações e bênçãos ministradas sobre a minha vida, pelo investimento, cuidado e amor de pais.

Aos meus pastores, Pr. Júlio e Pra. Dani e seus filhos, Hugo e Mariana, pela amizade, direcionamento, ensino, cuidado e amor.

Aos meus amigos, em especial aqueles que Deus me presenteou durante o mestrado.

A todos que estiveram ao meu lado nessa caminhada.

MUITO OBRIGADO!

BIOGRAFIA

FREDERICO DELLANO SOUZA SILVA, filho de Valdomiro Laurêncio da Silva e Maria de Fátima Souza Silva, nasceu em 17 de dezembro de 1992, em Porteirinha, Minas Gerais.

Concluiu o ensino médio em 2009, na Escola Estadual Miguel José da Cunha, em Porteirinha, Minas Gerais.

Em março de 2010, ingressou no curso de Agronomia no Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – *Campus* Januária, obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em setembro de 2014.

Em março de 2015, iniciou a Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal na Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, submetendo-se à defesa da dissertação em setembro de 2016.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO	1
MATERIAL E MÉTODOS	3
<i>Solo, Genótipos de Soja e Delineamento Experimental</i>	3
<i>Características Avaliadas</i>	4
<i>Análises Biométricas</i>	4
RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
CONCLUSÕES.....	16
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

RESUMO

SILVA, Frederico Dellano Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2016. **Caracterização de genótipos de soja quanto à eficiência de uso de fósforo.** Orientador: Pedro Ivo Vieira Good God. Coorientadores: Vinícius Ribeiro Faria e Roberto Ferreira Novais.

A economia de fertilizantes fosfatados, de modo particular em solos tropicais, passa pela utilização de genótipos de plantas com maior eficiência de uso de fósforo (P). Os objetivos deste trabalho foram identificar genótipos de soja eficientes no uso de P, identificar a importância relativa dos componentes da eficiência de uso de P (EUP) para baixa e alta disponibilidade de P no solo e avaliar a diversidade genética entre os genótipos com base em características relacionadas com EUP. Foram utilizados vinte e sete genótipos de soja avaliados em duas condições contrastantes na disponibilidade de P (baixa e alta disponibilidade). Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial com quatro repetições. As eficiências de uso (EUP), absorção (EAP) e utilização (EUtP) foram mensuradas, bem como as seguintes características relacionadas às mesmas: crescimento diário (CD), matéria fresca de parte aérea (MFPA), de raiz (MFR), e total (MFT), matéria seca de parte aérea (MSPA), de raiz (MSR) e total (MST), volume de raiz (VR), relação parte aérea/raiz (RPAR). Nesse trabalho foi detectada interação, genótipos x níveis de P, significativa, e o desdobramento para cada ambiente (baixo e alto nível de P) indicou a existência de variabilidade entre genótipos. Em condições de baixa disponibilidade de P, verificou-se que os valores de eficiência de uso são maximizados para genótipos de soja. Principalmente nesse ambiente, a eficiência de utilização foi o componente mais importante da eficiência de uso de P. Na condição de alta disponibilidade de P, o genótipo de soja NS7505IPRO destacou-se como eficiente no uso de P, enquanto que na condição de baixa disponibilidade, destacaram-se os genótipos AS3680IPRO e M7110IPRO. Os genótipos eficientes no uso de P na condição de baixa disponibilidade, AS3680IPRO e M7110IPRO, podem ser utilizados para geração de populações segregantes com uma elevada frequência de genes favoráveis à eficiência de uso de P.

ABSTRACT

SILVA, Frederico Dellano Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, september, 2016.
Characterization of soybean genotypes to phosphorus use efficiency. Adviser: Pedro Ivo Vieira Good God. Co-advisers: Vinícius Ribeiro Faria and Roberto Ferreira Novais.

The economy of phosphate fertilizers, particularly in tropical soils, involves the use of plant genotypes with higher phosphorus (P) use efficiency. The objectives of this study were to identify efficient soybean genotypes in P use, identify the relative importance of the P use efficiency (PUE) components for low and high availability of P in the soil and the genetic diversity among genotypes based on characteristics related to PUE. Twenty seven soybean genotypes used were evaluated in two contrasting conditions in the P availability (low and high availability). A completely randomized design in a factorial design, with four replications, was used. Use efficiency (PUE), absorption (PAE) and use (PUtE) were measured and the following characteristics related to the same: daily growth (DG), shoot fresh weight (SFW), root fresh weight (RFW) and total plant fresh weight (TFW), shoot dry weight (SDW), root dry weight (RDW) and total plant dry weight (TDW), root volume (RV), shoot-to-root ratio (RSR). In this work, was detected interaction genotype x P levels, significant, and the split for each environment (low and high P) indicated the existence of variability among genotypes. In low P condition, was found that the use efficiency values are maximized for soybean genotypes. Especially in this environment, PUtE was the most important component of PUE. In high P condition, the availability the soybean genotype NS7505IPRO stood out as efficient in the use of P, while in the low availability condition, stood out the AS3680IPRO and M7110IPRO genotypes. The efficient use of P genotypes in the low availability condition, and AS3680IPRO M7110IPRO can be used to generate segregating populations with a high frequency of favorable genes of PUE.

INTRODUÇÃO

A eficiência de uso de fósforo (EUP) de uma planta pode ser definida como a relação entre a produção de matéria seca total por unidade de fósforo (P) aplicado (Moll et al., 1982). A EUP pode ser dividida em dois componentes: eficiência de absorção (EAP), definida como a capacidade de um genótipo acumular P a partir do nutriente aplicado; e a eficiência de utilização de P (EUtP), dada pela capacidade de um genótipo em produzir matéria seca por quantidade de P acumulado (Marschner, 2012). Portanto, valores superiores de eficiência de uso de P podem ser obtidos aumentando-se a EAP e/ou a EUtP (DoVale e Fritsche-Neto, 2013). Em sistemas de cultivo intensivo, o aumento da eficiência de utilização é uma estratégia poderosa para melhoria da eficiência de uso (Wang et al., 2010).

O P possui papel fundamental nos processos metabólicos das plantas, incluindo a geração de energia, síntese de ácidos nucleicos, fotossíntese, glicólise, respiração, síntese de fosfolipídios, ativação e inativação de enzimas, reações redox, sinalização, metabolismo dos hidratos de carbono e fixação de nitrogênio (Vance et al., 2003).

Devido à sua grande importância, o P é um dos nutrientes mais utilizados na adubação de grandes culturas, como no caso da soja, e é um dos principais fatores limitantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, especialmente em áreas tropicais e subtropicais (Liang et al., 2010; Shen et al., 2011). A aplicação de grandes doses de P explica-se pela sua baixa disponibilidade em solos, particularmente, nos mais intemperizados. Nesses solos altamente oxidados, como os do Cerrado de modo geral, faz-se necessária a busca de meios para aumentar a eficiência de uso deste nutriente para a produção das culturas (Cordell et al., 2009). Em média, a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados tem sido relatada como sendo inferior a 10% (Baligar et al., 2001).

Estratégias que vão além da calagem, prática amplamente utilizada no Brasil, são indispensáveis para minimizar a fixação de P nos solos e melhorar o uso das fontes finitas de rocha fosfática da terra, avançando, assim, para uma produção agrícola mais sustentável (Roy et al., 2016). A utilização de genótipos eficientes no uso de nutrientes é, portanto, uma importante estratégia, reduzindo os danos ambientais, elevando a produtividade e/ou reduzindo os custos de produção, principalmente em solos do Cerrado (Oliveira et al., 2012). Desta forma, trabalhos com o objetivo de identificar e desenvolver genótipos mais eficientes no uso de P são cada vez mais importantes para o desenvolvimento da agricultura tropical (Mendes et al., 2015).

As variáveis consideradas nos processos fisiológicos que envolvem o uso dos nutrientes, tais como a absorção, sua translocação e utilização pelas plantas, indicam que há variabilidade

genética disponível para a seleção em programas de melhoramento genético (Sacramento e Rosolem, 1998).

A eficiência de uso de P tem sido estudada em diversas culturas como arroz, feijão e milho (Rotili et al., 2010; Oliveira et al., 2012; Mundim et al., 2013). No entanto, poucos trabalhos têm sido feitos para caracterizar genótipos de soja quanto à eficiência de uso de P. Assim, para que as estratégias de melhoramento genético para a eficiência de uso de P possam ser delineadas, é necessário: identificar fontes de variabilidade e identificar os principais caracteres determinantes da eficiência de uso de P. Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram identificar genótipos de soja eficientes no uso de P; identificar a importância relativa dos componentes da eficiência de uso de P (EUP) para baixa e alta disponibilidade de P no solo e avaliar a diversidade genética entre os genótipos com base em características relacionadas com a EUP.

MATERIAL E MÉTODOS

Solo, Genótipos de Soja e Delineamento Experimental

O experimento foi realizado no ano agrícola de 2016, em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba localizada no município de Rio Paranaíba – MG. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo de textura muito argilosa (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado no experimento

pH	P	K	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	t	SB	T	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn	P-rem	MO
	--- mg dm ⁻³ ---				----- cmol _c dm ⁻³ -----					%		----- mg dm ⁻³ -----				mg L ⁻¹	dag kg ⁻¹
5,4	2,8	23,0	19,0	2,3	0,7	0,3	3,3	3,0	7,9	38,4	0,3	1,6	30,0	6,1	0,4	13,7	1,8

pH (H₂O); M.O. = matéria orgânica (método Walkley-Black); Extratores: P, K, Cu, Fe, Mn e Zn (Mehlich-1); S – fosfato monocálcico (ácido acético); B (água quente).

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com quatro repetições para avaliar os vinte e sete genótipos em duas condições contrastantes quanto à disponibilidade de P (baixa e alta disponibilidade). Os genótipos foram avaliados. Os genótipos utilizados foram: ANTA82RR, NS7000IPRO, TMG1179RR, NS7300IPRO, M6972IPRO, BMXPONTAIPRO, M6410IPRO, DESAFIORR, BRS7470IPRO, M7110IPRO, NS7505IPRO, NS7447IPRO, AS3680IPRO, SYN1059VTOP, AS3730IPRO, M6210IPRO, POWERIPRO, BRS729IPRO, FPSSOLARIPRO, TEC7849IPRO, VX0620, VX053018RR, VX053600RR, VX045692, VX106111, VX08598 e M5947IPRO.

A fertilização foi constituída de 100 mg dm⁻³ de N (sulfato de amônio/nitrato de amônio), 100 mg dm⁻³ de K (cloreto de potássio), 50 mg dm⁻³ de S (sulfato de amônio), 1 mg dm⁻³ de B (ácido bórico), 4 mg dm⁻³ de Zn (sulfato de zinco), 2 mg dm⁻³ de Cu (sulfato de cobre). Para fornecimento de P utilizou-se superfosfato triplo nas doses de 50 mg dm⁻³ de P para baixa disponibilidade de P (BP) e 400 mg dm⁻³ de P para alta disponibilidade de P (AP).

O solo foi pesado de acordo com o volume dos vasos (5 dm³), destorroado, homogeneizado, seco ao ar e passado em peneira de malha de 2 mm. Seis sementes de soja foram semeadas e dez dias após a emergência (DAE) foi feito o desbaste, deixando-se três plantas em cada vaso com tamanho médio. Para manutenção da umidade foram feitas irrigações diárias.

Características Avaliadas

Aos 30 DAE, a altura das plantas foi medida do colo à inserção do último trifólio expandido e posteriormente dividida por 30 dias - número de dias em que cada genótipo ficou em casa de vegetação - para calcular o crescimento diário (CD). A parte aérea das plantas foi cortada rente ao solo e as raízes foram retiradas com auxílio de água; a matéria fresca da parte aérea (MFPA), de raiz (MFR), total da planta (MFT) e volume de raízes (VR) foram mensurados. A determinação do VR foi realizada colocando-se as raízes em proveta graduada, contendo um volume conhecido de água. Pela diferença, obteve-se o volume de raízes, segundo método descrito por Basso (1999). A parte aérea e as raízes foram acondicionadas separadamente em sacos de papel para secagem em estufa de ventilação forçada a 70 °C por 72 h, para obtenção da matéria seca de parte aérea (MSPA) e de raiz (MSR). Depois de seca, a matéria seca total da planta (MST) e a relação parte aérea/raiz (RPAR) foram calculados.

A determinação do teor de P foi feita por meio da digestão nitroperclórica, e posterior determinação por colorimetria, utilizado o método do complexo fosfo-molibdico, segundo Braga e Defelipo (1974).

A eficiência de uso de P (EUP) foi calculada com base em seus componentes: eficiência de absorção de fósforo (EAP) e eficiência de utilização de fósforo (EUtP), como proposto por Moll et al. (1982):

$$EAP = \frac{P_{\text{acumulado}} (mg)}{P_{\text{aplicado}} (mg)}$$

$$EUtP = \frac{MST (mg)}{P_{\text{acumulado}} (mg)}$$

$$EUP = \frac{MST (mg)}{P_{\text{aplicado}} (mg)}$$

Análises Biométricas

Os valores genéticos preditos foram estimados usando a abordagem da melhor predição linear não viesada (*Best Linear Unbiased Predictor* - BLUP) e os componentes de variância por meio do método da máxima verossimilhança restrita (*Restricted Maximum Likelihood* - REML) (Patterson e Thompson, 1971; Henderson, 1974, 1975). Os genótipos foram assumidos como sendo de efeito aleatório, enquanto os níveis de P foram considerados como sendo de efeitos fixos conforme modelo estatístico:

$$y_{ijk} = \mu + a_i + \beta_j + (a\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

Em que:

y_{ijk} : valor fenotípico;

μ : constante do modelo;

a_i : efeito aleatório do i-ésimo genótipo;

β_j : efeito fixo do j-ésimo nível de fósforo;

$(a\beta)_{ij}$: efeito aleatório da interação do i-ésimo genótipo com o j-ésimo nível de P;

e_{ijk} : erro aleatório.

Em termos matriciais o modelo misto é dado por:

$$y = X\beta + Zg + e$$

em que:

y = vetor de observações;

X = matriz de incidência dos efeitos fixos (conhecida);

β = vetor de efeitos fixos desconhecidos – nível de fósforo;

Z = matriz de incidência dos efeitos aleatórios (conhecida);

g = vetor de efeitos aleatórios desconhecidos – genótipos e interação genótipo x P;

e = vetor de erros aleatórios.

Assume-se que os efeitos aleatórios e os erros têm distribuição normal com média zero e são não correlacionados ($g \sim N(0, G)$, sendo $G = I\sigma^2_g$ e $e \sim N(0, R)$, sendo $R = I\sigma^2_e$). A predição dos efeitos aleatórios e estimação dos efeitos fixos foram feitas por meio das equações de modelo misto (EMM) descritas por Henderson (1984):

$$\begin{bmatrix} X'R^{-1}X & X'R^{-1}Z_1 \\ Z_1'R^{-1}X & Z_1'R^{-1}Z + G_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta^0 \\ \hat{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'R^{-1}y \\ Z_1'R^{-1}y \end{bmatrix}$$

Para a obtenção das soluções das EMM, os componentes de variância genéticos e não genéticos foram assumidos como desconhecidos, como ocorre na prática, sendo estimados por meio do método REML. A análise de Deviance (ANADEV) foi realizada por meio do teste da razão da verossimilhança (*Likelihood Ratio Test* - LRT) utilizando-se o PROC MIXED no software SAS (*Statistical Analysis System*), versão 9.2 (SAS Institute 2007).

As herdabilidades no sentido amplo foram calculadas como a razão entre variâncias genótípicas e fenotípicas. Para identificar os genótipos eficientes e ineficientes, um intervalo de confiança de 95% para a média dos genótipos no âmbito de cada nível de P foi calculado com base na distribuição t pela seguinte fórmula:

$$IC = \left(\bar{x} \pm t_{gl,\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_r^2}{gl_r}} \right)$$

em que:

$\bar{x}$ = média;

$\hat{\sigma}_r^2$ = variância residual;

gl_r = graus de liberdade do resíduo.

Valores genotípicos preditos mais elevados do que o limite superior do intervalo de confiança foram classificados como eficientes, e valores genotípicos inferiores do que o limite inferior foram classificados como ineficientes.

Foi calculada a matriz de correlação genotípica utilizando-se o PROC CORR no SAS, versão 9.2 (SAS Institute 2007). As correlações foram calculadas para cada nível P e entre os dois níveis de P, por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r_g) conforme a seguinte fórmula:

$$r_g = \frac{\hat{\sigma}_{gxy}}{\sqrt{\hat{\sigma}_{gx}^2 \hat{\sigma}_{gy}^2}}$$

em que:

$\hat{\sigma}_{gxy}$ = estimador da covariância genotípica entre os caracteres;

$\hat{\sigma}_{gx}^2$ e $\hat{\sigma}_{gy}^2$ = estimadores das variâncias genotípicas das características.

Para a avaliação da diversidade genética realizou-se o diagnóstico de multicolinearidade com as características em estudo. O diagnóstico inicial indicou colinearidade moderada a forte segundo critério de (Montgomery e Peck, 1981). Com a eliminação dos caracteres necessários, realizou-se novamente o diagnóstico e o mesmo indicou colinearidade fraca entre os caracteres, permitindo assim a realização da análise de agrupamento. A diversidade genética foi realizada por meio de análise multivariada com a padronização das médias genotípicas preditas, evitando-

se efeitos devidos às diferenças de escala, com a utilização do programa R (R Core Team, 2015). A distância genética entre os genótipos foi estimada por meio da distância euclidiana ao quadrado e usada como dados de entrada para análise de cluster com base no método de ligação média entre grupos (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean* - UPGMA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise conjunta dos ambientes com baixo e alto P não foi detectada variabilidade genética, exceto para as características CD, MSR e VR (Tabela 2). Porém, foi detectada interação significativa e o desdobramento para cada ambiente (baixo e alto nível de P) indicou a existência de variabilidade e, portanto, comportamento diferencial entre os genótipos. O coeficiente de variação (CV%) apresentou uma amplitude de 5,60 a 22,43% (alto P) e 7,31 a 32,26% (baixo P). Tais valores indicam boa precisão experimental. A herdabilidade no sentido amplo variou entre 0,29 e 0,94 (alto P) e 0,60 e 0,90 (alto P). Esses resultados apontam que há variabilidade e acurácia suficientes para o melhoramento genético da eficiência de uso de P em genótipos de soja.

Os valores médios para a eficiência de absorção de P foram iguais em ambos os ambientes de disponibilidade de P (Tabela 2). Por outro lado, a eficiência de utilização de P foi quase quatro vezes maior sob baixa disponibilidade de P em comparação a alta disponibilidade. Na Figura 1B observa-se que a variação observada para valores de eficiência de utilização foi maior que a eficiência de absorção sob baixo teor de P. Consequentemente, e mais em função da eficiência de utilização, a eficiência de uso foi aproximadamente cinco vezes maior nessa condição.

É esperado que em condições de limitação de P os valores de eficiência de uso sejam maximizados (Fageria, 1998). Além disso, em condições de baixa disponibilidade de P, a eficiência média de utilização de P é o componente mais importante para a eficiência de uso. Uma explicação provável para a baixa contribuição da absorção é que a seleção no melhoramento genético ocorre em condições de alta disponibilidade de nutrientes, inclusive o P. Dessa forma, alelos relacionados com a eficiência de absorção em ambientes de estresse podem ter sido perdidos, reduzindo sua contribuição para a eficiência de uso (Wissuwa et al., 2009; Wang et al., 2010).

A eficiência de utilização de P não apresentou variabilidade genética sob alto P (Tabela 2). Desta forma, não foi detectado comportamento diferencial entre genótipos para essa característica. Na Figura 1A percebe-se que a eficiência de absorção deve ser o principal componente da EUP sob alto P, de forma contrária ao verificado para ambiente de baixo P. Além disso, a eficiência de utilização nessa condição apresenta baixa correlação com a eficiência de uso de P (Tabela 3). Portanto, em ambientes de alta disponibilidade do nutriente, a eficiência de absorção passa a ser mais importante do que a eficiência de utilização.

Tabela 2. Estimativas dos componentes de variância, herdabilidade no sentido amplo (h^2) e coeficientes de variação experimental (CV%) para características relacionadas à eficiência de uso de fósforo avaliadas em 27 genótipos de soja sob duas condições contrastantes na disponibilidade de P

Característica	Conjunta		Alto P				Baixo P			
	Genótipos ¹	Genótipos x P ¹	Genótipos ¹	h^2	Média	CV%	Genótipos ¹	h^2	Média	CV%
EUP (mg mg⁻¹)	14,1867 ^{ns}	112,1600 ^{**}	3,4675 ^{**}	0,62	16,10	16,10	250,23 ^{**}	0,81	84,84	17,62
EAP (mg mg⁻¹)	1,40x10 ⁻⁵ ^{ns}	2,40x10 ⁻⁵ [*]	1,50x10 ⁻⁵ ^{**}	0,70	0,03	16,35	5,60x10 ⁻⁵ [*]	0,60	0,03	32,26
EUP (mg mg⁻¹)	2,56x10 ⁴ ^{ns}	1,35x10 ⁵ ^{**}	1,84x10 ³ ^{ns}	0,29	598,39	22,43	3,16x10 ⁵ ^{**}	0,84	2350,42	20,34
CD (cm)	0,0030 ^{**}	0,0006 ^{**}	0,0043 ^{**}	0,94	0,57	5,60	0,0030 ^{**}	0,90	0,47	7,31
MFPA (g)	2,1663 ^{ns}	3,8880 ^{**}	6,0058 ^{**}	0,73	21,81	13,33	6,1105 ^{**}	0,90	12,72	12,85
MFR (g)	6,1902 ^{ns}	15,2417 ^{**}	28,7489 ^{**}	0,72	32,56	20,14	14,1110 ^{**}	0,79	21,38	17,86
MFT (g)	14,7095 ^{ns}	15,7464 [*]	30,6390 [*]	0,58	54,37	17,09	32,0111 ^{**}	0,86	34,08	13,34
MSPA (g)	0,1201 ^{ns}	0,1739 ^{**}	0,3121 ^{**}	0,67	4,82	16,22	0,2895 ^{**}	0,80	2,74	19,40
MSR (g)	0,0531 [*]	0,0069 ^{ns}	0,0338 ^{ns}	0,38	2,22	20,87	0,0939 ^{**}	0,67	1,52	27,58
MST (g)	0,2760 ^{ns}	0,4397 ^{**}	0,7987 ^{**}	0,72	7,16	15,23	0,6340 ^{**}	0,77	4,31	19,75
VR (cm³)	8,3297 [*]	10,7531 ^{**}	21,9713 ^{**}	0,83	29,77	14,06	16,2003 ^{**}	0,83	18,44	19,63
RPAR	0,0260 ^{ns}	0,0918 ^{**}	0,0961 ^{**}	0,71	2,24	17,22	0,1425 ^{**}	0,80	1,96	18,86

¹ Valores obtidos pelo teste da razão de verossimilhança (*Likelihood Ratio Test* – LRT). EUP, eficiência de uso de fósforo; EAP, eficiência de absorção de fósforo; EUP, eficiência de utilização de fósforo; CD, crescimento diário; MFPA, matéria fresca da parte aérea; MFR, matéria fresca da raiz; MFT, matéria fresca total; MSR, matéria seca da raiz; MST, matéria seca total; VR, volume de raízes; RPAR, relação parte aérea/raiz. ^{ns}, não significativo; * e ** significativo a $p < 0,05$ e $p < 0,01$ de probabilidade pelo teste χ^2 com 1 grau de liberdade, respectivamente.

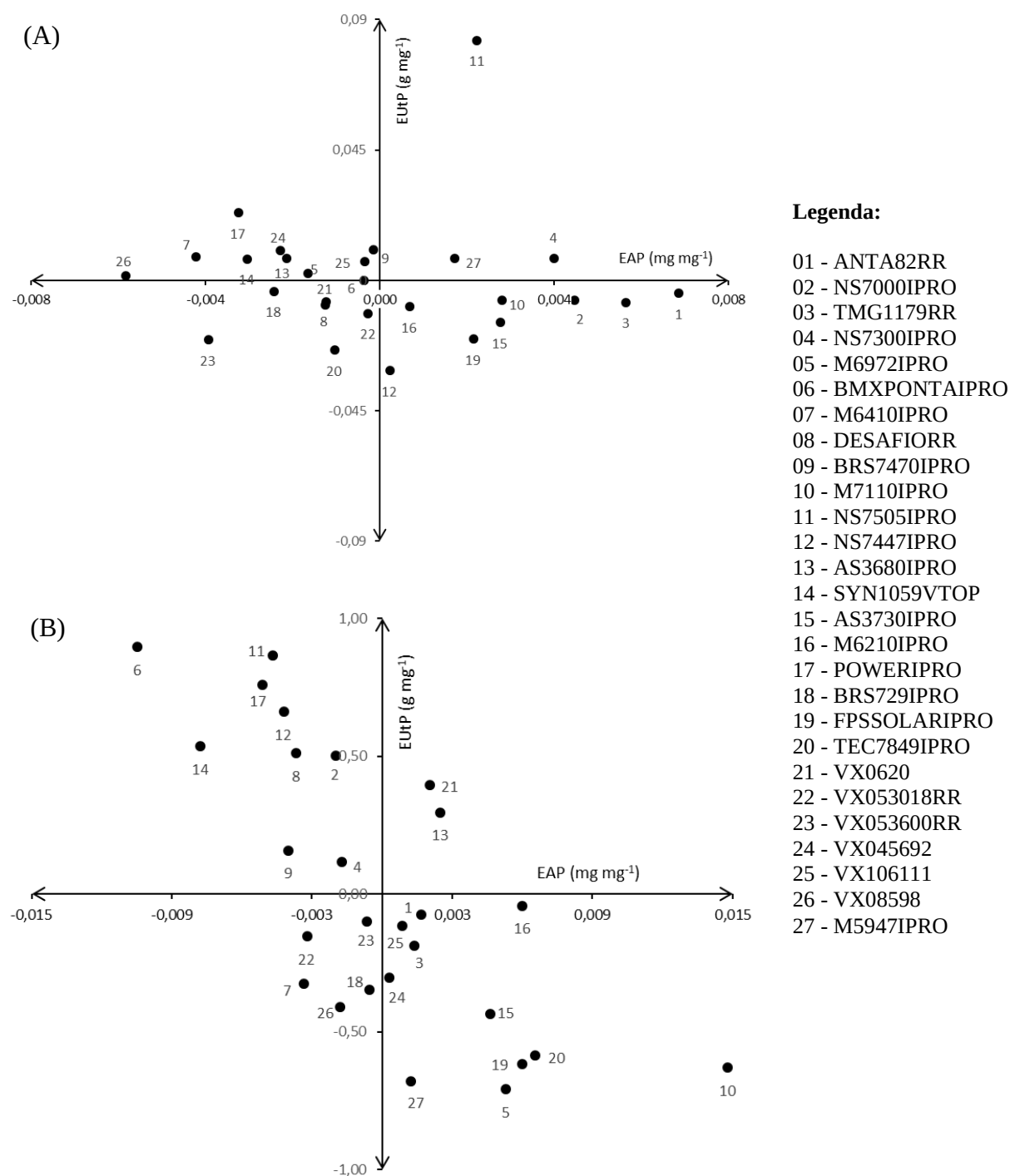


Figura 1. Valores genotípicos preditos para a eficiência de absorção de fósforo (EAP) e eficiência de utilização de fósforo (EUP) dos 27 genótipos de soja avaliados sob alto teor (A) e baixo teor de P (B)

As variáveis que expressam a biomassa vegetal diminuíram sob baixa disponibilidade de P (Tabela 2). A limitação de P reduz o crescimento e acúmulo de biomassa. Isto ocorre porque o P desempenha papel de grande importância nos processos metabólicos, como a fotossíntese, formação de ácidos nucleicos, fosfolipídios, entre outros (Veneklaas et al., 2012). Exatamente em função do menor crescimento vegetativo a eficiência de utilização em ambientes com P limitado torna-se mais importante que a absorção e deve estar associada à realocação interna de fósforo.

Os genótipos TMG1179RR, NS7000IPRO, ANTA82RR, NS7300IPRO, VX106111, M7110IPRO, AS3730IPRO e AS3680IPRO foram eficientes no uso de P nos dois ambientes contrastantes na disponibilidade de P (Figura 2). Esse resultado revela o potencial genético desses genótipos nos dois níveis de P. Em contraste, os genótipos SYN1059VTOP, M6972IPRO, VX045692, M6410IPRO e VX08598 foram ineficientes, e, portanto, apresentam baixo desempenho para a eficiência de uso de P.

De maneira geral, no ambiente de alta disponibilidade de P os genótipos eficientes no uso de P foram aqueles que tiveram os maiores valores de eficiência de absorção de P e no ambiente de baixa disponibilidade de P aqueles que tiveram os maiores valores de eficiência de utilização (Figura 1). Cabe ressaltar que, na condição de alta disponibilidade de P, o genótipo NS7505IPRO se destaca como eficiente no uso de P devido ao alto valor genotípico predito para EUtP (Figura 1A). Já na condição de baixo P, o genótipo M7110IPRO apresentou alta eficiência de uso de P devido à alta absorção de P em relação aos demais (Figura 1B). A falta de correlação entre utilização e uso e a correlação positiva entre absorção e uso corroboram para esse resultado (Tabela 3). Entretanto, como será discutido adiante, as eficiências de utilização e absorção são inevitavelmente ligadas, resultando em classificações confusas quando há diferenças na absorção de P (Rose et al., 2011).

As correlações genotípicas para o comportamento nos dois ambientes não foram significativas para a eficiência de uso e seus componentes, bem como para a maioria das características de biomassa vegetal (Tabela 3, diagonal). Esse resultado reforça a necessidade de análise individual para as duas condições de disponibilidade de P como verificado também pela interação significativa de genótipo x P.

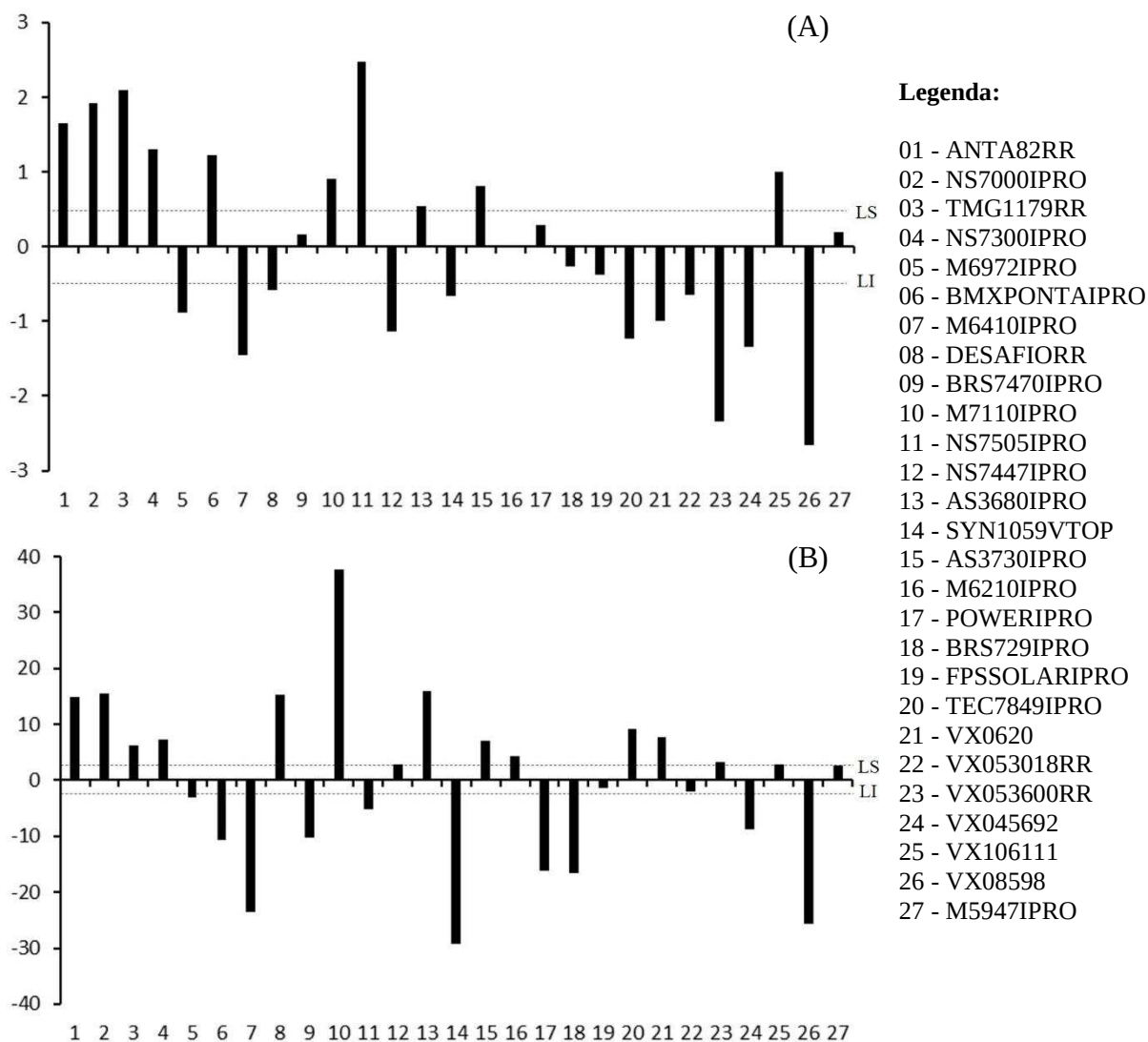


Figura 2. Limites superiores (LS) e inferiores (LI) do intervalo de confiança de 95% e valores genotípicos preditos para a eficiência de uso de fósforo (EUP) dos 27 genótipos de soja avaliados sob (A) alto teor de P e avaliados sob (B) baixo teor de P

Tabela 3. Correlações genotípicas entre as características relacionadas à eficiência de uso de fósforo avaliadas em 27 genótipos de soja sob alto teor de P (acima da diagonal) e baixo teor de P (abaixo da diagonal). Correlações para a mesma característica das duas condições contrastantes na disponibilidade de P estão apresentadas na diagonal

Característica	EUP	EAP	EUtP	CD	MFPa	MFR	MFT	MSPa	MSR	MST	VR	RPAR
EUP	0,32 ^{ns}	0,71 ^{**}	0,40 [*]	-0,02 ^{ns}	0,52 ^{**}	0,67 ^{**}	0,84 ^{**}	0,83 ^{**}	0,56 ^{**}	0,95 ^{**}	0,51 ^{**}	0,20 ^{ns}
EAP	0,63 ^{**}	0,28 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,42 [*]	0,33 ^{ns}	0,61 ^{**}	0,65 ^{**}	0,45 [*]	0,68 ^{**}	0,38 [*]	-0,10 ^{ns}
EUtP	-0,12 ^{ns}	-0,71 ^{**}	0,36 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,38 [*]	0,58 ^{**}	0,43 [*]	0,27 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,43 [*]	0,07 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
CD	0,42 [*]	0,27 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	0,72 ^{**}	0,38 [*]	-0,17 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,28 ^{ns}
MFPa	0,90 ^{**}	0,59 ^{**}	-0,18 ^{ns}	0,63 ^{**}	0,26 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,39 [*]	0,61 ^{**}	0,12 ^{ns}	0,44 [*]	0,38 [*]	0,45 [*]
MFR	0,84 ^{**}	0,48 ^{**}	-0,03 ^{ns}	0,38 [*]	0,72 ^{**}	0,21 ^{ns}	0,85 ^{**}	0,57 ^{**}	0,34 ^{ns}	0,61 ^{**}	0,59 ^{**}	0,57 ^{**}
MFT	0,88 ^{**}	0,53 ^{**}	-0,07 ^{ns}	0,47 [*]	0,82 ^{**}	0,95 ^{**}	0,29 ^{ns}	0,75 ^{**}	0,43 [*]	0,79 ^{**}	0,56 ^{**}	0,26 ^{ns}
MSPa	0,92 ^{**}	0,56 ^{**}	-0,17 ^{ns}	0,53 ^{**}	0,93 ^{**}	0,76 ^{**}	0,82 ^{**}	0,29 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,81 ^{**}	0,48 ^{**}	0,42 [*]
MSR	0,68 ^{**}	0,43 [*]	-0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,52 ^{**}	0,73 ^{**}	0,68 ^{**}	0,56 ^{**}	0,44 [*]	0,62 ^{**}	0,25 ^{ns}	-0,37 ^{ns}
MST	0,97 ^{**}	0,64 ^{**}	-0,12 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,83 ^{**}	0,83 ^{**}	0,86 ^{**}	0,88 ^{**}	0,72 ^{**}	0,27 ^{ns}	0,41 [*]	0,17 ^{ns}
VR	0,66 ^{**}	0,38 [*]	-0,09 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,52 ^{**}	0,64 ^{**}	0,61 ^{**}	0,57 ^{**}	0,60 ^{**}	0,63 ^{**}	0,34 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
RPAR	-0,19 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,58 ^{**}	0,32 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,16 ^{ns}

EUP, eficiência de uso de fósforo; EAP, eficiência de absorção de fósforo; EUtP, eficiência de utilização de fósforo; CD, crescimento diário; MFPa, matéria fresca da parte aérea; MFR, matéria fresca da raiz; MFT, matéria fresca total; MSPa, matéria seca da parte aérea; MSR, matéria seca da raiz; MST, matéria seca total; VR, volume de raízes; RPAR, relação parte aérea/raiz. ^{ns}, não significativo; * e ** significativo a $p < 0,05$ e $p < 0,01$ de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Correlação negativa e significativa foi obtida entre as eficiências de absorção e utilização no ambiente de baixa disponibilidade de P (Tabela 3). Em condições de baixa disponibilidade de P, diferenças na eficiência de absorção entre genótipos podem prejudicar os resultados obtidos para a eficiência de utilização (Rose et al., 2011). Isso ocorre, pois, a eficiência de absorção e utilização estão ligadas fazendo com que genótipos com maiores valores de eficiência de absorção sofram um menor grau de estresse, resultando em menores valores de eficiência de utilização de P (Rose et al., 2011). Esses resultados são evidenciados quando se analisa as correlações entre a eficiência utilização de P e as variáveis que expressam a biomassa vegetal, sendo essas não significativas sob baixo P.

No ambiente de alta disponibilidade de P, correlação não significativa foi obtida entre as eficiências de absorção e utilização. Nessa condição, o efeito da eficiência de absorção sobre a eficiência de utilização é minimizado (Rose et al., 2011). Como consequência, a maior correlação entre a eficiência de absorção e uso reflete o maior efeito da absorção sobre o uso de P quando este nutriente está mais disponível.

A seleção de genótipos superiores em programas de melhoramento é complexa quando se trabalha com características quantitativas. Isso ocorre devido ao padrão de herança poligênica, a grande influência do ambiente e a inter-relação entre as características, de maneira que a seleção em uma provoca mudanças na outra. Desta forma, devido ao efeito das correlações negativas entre eficiência de absorção e utilização, recomenda-se a utilização de índices de seleção em trabalhos futuros para minimizar negativos na seleção de uma característica sobre a outra. Cabe ressaltar ainda que as características matéria seca de parte aérea e matéria seca total apresentaram elevada correlação positiva com a eficiência de uso de P nas duas condições de disponibilidade de P. Sendo assim, essas características podem ser utilizadas para a seleção indireta de genótipos de soja eficientes no uso de P.

A avaliação da diversidade genética feita por meio de análise multivariada para alta disponibilidade de P classificou os genótipos de soja em dois grupos (Figura 3A). Na condição de baixa disponibilidade de P os genótipos foram divididos em três grupos principais (Figura 3B). Os genótipos mais divergentes foram NS7505IPRO e VX053600RR (distância genética = 95,35) na condição de alta disponibilidade de P e M7110IPRO e VX045692 (distância genética = 86,11) na condição de baixa disponibilidade de P. Esses genótipos podem ser cruzados para gerar uma população segregante para estudos de mapeamento de QTL (*Quantitative Trait Loci*). Em contraste, os genótipos mais similares foram DESAFIORR e M6210IPRO (distância genética = 1,46) sob alto teor de P e VX053018RR e VX045692 (distância genética = 1,68) sob baixo teor de P.

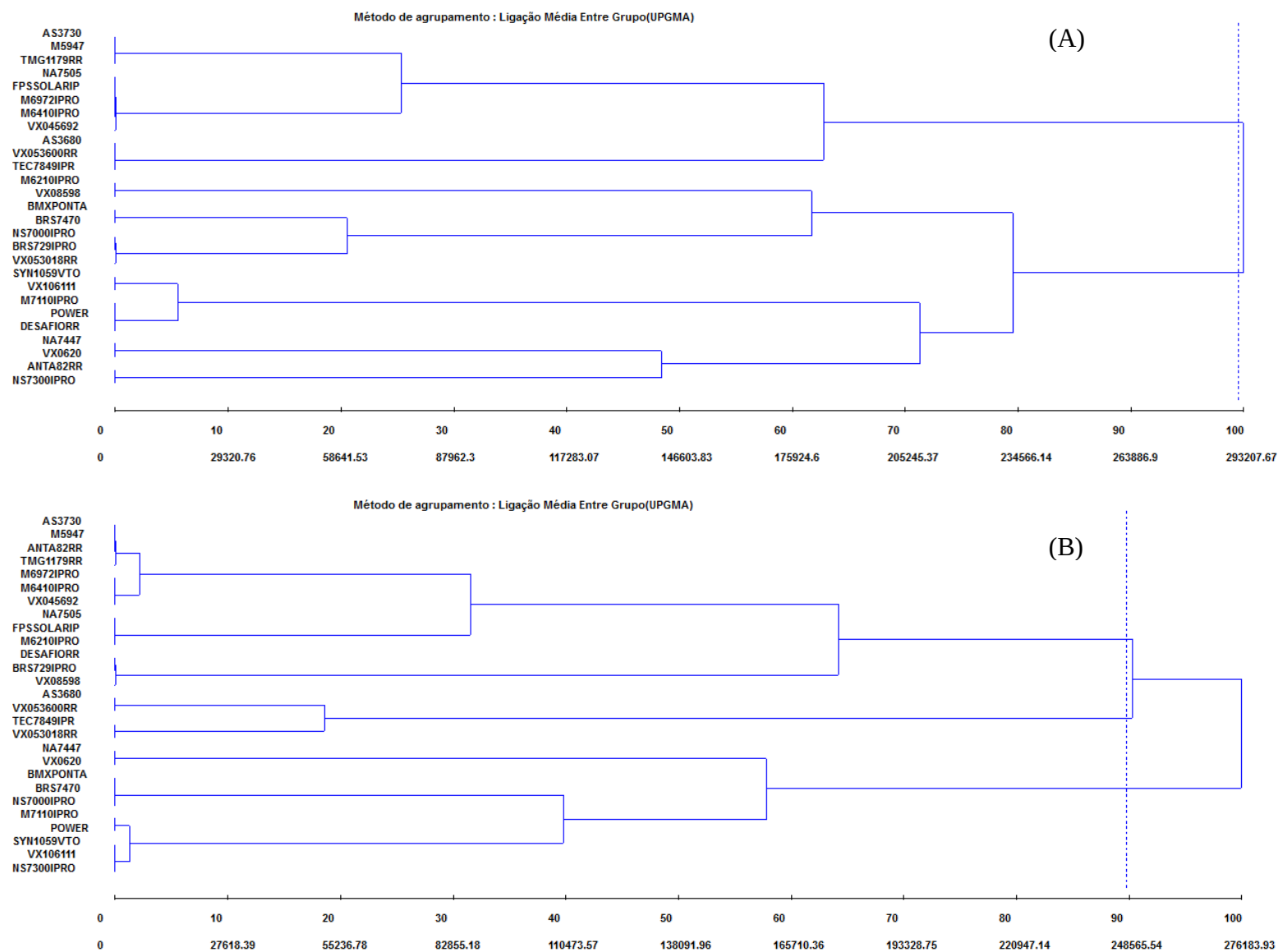


Figura 3. Dendrograma dos 27 genótipos de soja (A) avaliados sob alto teor de P; (B) avaliados sob baixo teor de P

Os genótipos classificados como eficientes no uso de P que ficaram em grupos distintos, como por exemplo, os genótipos NS7505IPRO e NS7000IPRO sob alto teor de P (Figura 3A) e M7110IPRO e AS3680IPRO sob baixo teor de P (Figura 3B) podem ser genitores potenciais para a produção de populações com elevada frequência de genes favoráveis à eficiência de uso de P.

CONCLUSÕES

Em condições de limitação por P, os valores de eficiência de uso são maximizados para genótipos de soja.

Em condições de baixa disponibilidade de P a eficiência de utilização foi o componente mais importante da eficiência de uso de P. Já em condições de alta disponibilidade de P a eficiência de absorção deve ser o principal componente da eficiência de uso de P.

Os genótipos de soja TMG1179RR, NS7000IPRO, ANTA82RR, NS7300IPRO, VX106111, M7110IPRO, AS3730IPRO e AS3680IPRO se destacaram como eficientes no uso de P nas condições de alto e baixo P.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7-8, p. 921–950, 2001.
- BASSO, S. M. S. **Caracterização morfológica e fixação biológica de nitrogênio de espécies de Adesmia DC. e Lotus L.** 1999. 268f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BRAGA, J.M. e DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73–85, 1974.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.
- DOVALE, J. C. e FRITSCHÉ-NETO, R. Genetic control of traits associated with phosphorus use efficiency in maize by REML/BLUP. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 44, n. 3, p. 554–563, 2013.
- FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 128–131, 1998.
- HENDERSON, C. R. General flexibility of linear model techniques for sire evaluation. **Journal of Dairy Science**, v. 57, n. 8, p. 963–972, 1974.
- HENDERSON, C. R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model published by : international biometric society stable. **Biometrics**, v. 31, n. 2, p. 423–447, 1975.
- HENDERSON, C. R. **Applications of linear models in animal breeding**. Guelph: University of Guelph, 1984. 462 p.
- LIANG, Q.; CHENG, X.; MEI, M; YAN, X; LIAO, H. QTL analysis of root traits as related to phosphorus efficiency in soybean. **Annals of Botany**, v. 106, n. 1, p. 223–234, 2010.
- MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Academic Press, 2012. 645 p.
- MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M.; SOUZA, J. C.; GUIMARÃES, P. E. O.; MAGALHAES, J. V.; GARCIA, A. A. F.; PARENTONI, G. S. N.; GUIMARAES, C. T. Genetic architecture of phosphorus use efficiency in tropical maize cultivated in a low-P soil.

Crop Science, v. 54, n. 4, p. 1530–1538, 2015.

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

MONTGOMERY, D. C. e PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. 1982.

MUNDIM, G. B.; VIANA, J. M. S.; MAIA, C. Early evaluation of popcorn inbred lines for phosphorus use efficiency. **Plant Breeding**, v. 132, n. 6, p. 613–619, 2013.

OLIVEIRA, T. C.; SILVA, J. SALGADO, F. H. M.; SOUSA, S. A.; FIDELIS, R. R.. Eficiência e resposta à aplicação de fósforo em feijão comum em solos de cerrado. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 16–24, 2012.

PATTERSON, H. D. e THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 545–554, 1971.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015. URL <https://www.R-project.org/>.

RAMAEKERS, L.; RAO, I. M.; BLAIR, M. W.; VANDERLEYDEN, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. **Field Crops Research**, v. 117, n. 2-3, p. 169–176, 2010.

ROSE, T. J.; ROSE, M. T.; PARIASCA-TANAKA, J.; HEUER, S.; WISSUWA, M. The frustration with utilization: why have improvements in internal phosphorus utilization efficiency in crops remained so elusive? **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 1–5, 2011.

ROTILI, E. A.; FIDELIS, R. R.; SANTOS, M. M.; NETO, M. D. DE C.; KICHEL, E.; CANCELLIER, E. L. Eficiência no uso de fósforo de variedades de arroz cultivadas em solos de várzea irrigada. **Revista Ceres**, v. 57, n. 3, p. 415–420, 2010.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORTER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 43, p. 1–6, 2016.

SACRAMENTO, L. V. S. e ROSOLEM, C. A. Eficiência de absorção e utilização de potássio por plantas de soja em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 57, n. 2, p. 355–365, 1998.

SAS Institute. The SAS System for Windows, version 9.2. SAS Institute Inc., Cary, 2007.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 2011.

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

VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; BRAGG, J.; FINNEGAN, P. M.; LOVELOCK, C. E.; PLAXTON, W. C.; PRICE, C. A.; SCHEIBLE, W.; SHANE, M. W.; WHITE, P. J.; RAVEN, J. A. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v. 195, n. 2, p. 306–320, 2012.

WANG, X.; SHEN, J.; LIAO, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? **Plant Science**, v. 179, n. 4, p. 302–306, 2010.

WISSUWA, M.; MAZZOLA, M.; PICARD, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits. **Plant and Soil**, v. 321, n. 1-2, p. 409–430, 2009.