Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Fenotipagem de genótipos de milho em condições de estresse por alumínio e sua correlação com produtividade de grãos

Phenotyping of maize genotypes under aluminum stress and its correlation with grain yield

Gustavo André Colombo[1], Aurélio Vaz-de-Melo[1], Markus Taubinger[1], Eduardo Alves de Faria[1], Rodrigo de Castro Tavares[1]

[1] Universidade Federal do Tocantins (UFT), Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Rua Badejós, Chácaras 69 e 72, Caixa Postal 66, CEP: 77402-970, Gurupi-TO. E-mail: colombo@uft.edu.br

Recebido em: 28/05/2013 Aceito em: 27/08/2013

Resumo. Níveis tóxicos de alumínio podem afetar a taxa de crescimento radicular e, consequentemente, reduzir o potencial produtivo de culturas, como a do milho. A fenotipagem baseada no desenvolvimento do sistema radicular é o melhor critério para a avaliação da tolerância a esse elemento. Com isso, o objetivo deste estudo foi fenotipar genótipos de milho em condições de estresse por alumínio e determinar sua correlação com a produtividade de grãos, além de quantificar a variabilidade genética dos híbridos em função da dissimilaridade genética e identificar híbridos promissores na seleção de progênies. Em experimento em casa de vegetação, 35 híbridos foram cultivados em solução nutritiva contendo 3 mg L^{-1} de Al^{3+}, onde se avaliou altura de planta, diâmetro de colmo, comprimento da raiz principal, volume de raiz, massa fresca e seca do sistema radicular, e massa fresca e seca da parte aérea. Esses dados foram correlacionados com os de produtividades de grãos procedentes do experimento em campo, além da determinação da divergência genética. Variações morfológicas foram observadas na parte aérea e nas raízes de todos os genótipos, em função do estresse por alumínio. Verificou-se correlação positiva e significativa entre massa fresca da parte aérea e produtividade de grãos podendo, com isso, realizar a seleção precoce excluindo os genótipos sensíveis. Os híbridos P 30F80, UFT-15 e UFT-22 foram classificados como tolerantes ao estresse, com desempenho superior quando cultivados, tanto em solução nutritiva, quanto em campo, sendo promissores para obtenção de populações segregantes com tolerância ao alumínio tóxico.

Palavras-chave. Cultivo hidropônico, dissimilaridade genética, seleção precoce, *Zea mays*

Abstract. Toxic levels of aluminum can affect the rate of root growth and hence reduce the potential productivity of crops such as maize. Phenotyping based on the development of the root system is the best criterion for evaluating the tolerance to this element. With this, the objective of this study was to characterize maize genotypes under aluminum stress and determine its correlation with grain yield and to quantify the genetic variability of hybrids due to the genetic diversity and identify promising hybrids in the selection process. In a greenhouse experiment, 35 hybrids were grown in nutrient solution containing 3 mg L^{-1} Al^{3+}, which we assessed plant height, stem diameter, length of the main root, root volume, fresh and dry weight of the root system, and fresh and dry weight of shoots. These data were correlated with the of grain yield of genotypes originating from field experiment and the determination of genetic divergence. Morphological variations were observed in shoots and roots of all genotypes, due to aluminum stress. There was a significant positive correlation between fresh weight of shoot and grain yield may, therefore, accomplish early selection excluding sensitive genotypes. Hybrids P 30F80, UFT-15 and UFT-15 were classified as tolerant to aluminum stress, top performance when grown in both nutrient solution and field, promising to obtain segregating populations for aluminum tolerance .

Keywords. Hydroponic growing, genetic dissimilarity, selection precocious, *Zea mays*

Introdução

A pecuária tradicional em regiões de cerrado brasileiro, na qual as pastagens são implantadas com pouca ou nenhuma tecnologia, é caracterizada pelo extrativismo, e, salvo casos isolados de manejo sustentável, composta por pastagens degradadas e o solo com baixos níveis de fertilidade e excessiva toxidez por alumínio (Al^{3+}). Incrementos nos índices

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

produtivos exigem a recuperação de áreas marginais através da adoção de sistemas de produção diferenciados, como os cultivos consorciados e a integração lavoura-pecuária (Macedo, 2009).

A calagem, que comumente neutraliza o H^+ e Al^{3+} em solução e corrigi a acidez do solo, em processos de recuperação de pastagens sem incorporação, atinge somente as camadas superficiais, não solucionando o problema de acidez no subsolo que, mesmo com a aplicação de condicionadores de solo como o gesso agrícola, mantém o Al^{3+} solúvel e tóxico às plantas (Sávio et al., 2012).

A redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis tem sido considerada o principal efeito de níveis tóxicos de alumínio, afetando o alongamento e a divisão celular. Segundo Garzón et al. (2011), na região meristemática das raízes principais e laterais, o Al^{3+} tem rápido acesso ao apoplasto, e exerce grande competição por componentes ligantes da membrana plasmática, de forma que o fluxo de Ca^{2+} entre as células é dificultado, e por consequência, a interrupção do processo de mitose. Posteriormente em meio simplasto, polímeros de Al^{3+} podem ligar-se a fosfatos do DNA acarretando na estabilização da dupla fita e, consequentemente, um decréscimo da atividade de duplicação (Barceló & Poschenrieder, 2002). Esta restrição diminui a capacidade da planta em obter água e nutrientes do subsolo em virtude do enraizamento superficial, reduzindo o potencial produtivo das mesmas (Taiz & Zeiger, 2009).

No caso da cultura do milho, usualmente empregada na integração lavoura-pecuária, a maioria dos híbridos comerciais é suscetível ao Al^{3+}, com sua produtividade fortemente depreciada em função da elevada acidez do solo (Galon et al., 2010). Dessa forma, uma alternativa para aumentar a eficiência desta cultura em áreas marginais é o desenvolvimento de genótipos adaptados a solos com níveis tóxicos de alumínio, através do aproveitamento da variabilidade genética natural dentro da espécie quanto a tolerância ao Al^{3+} (Cançado et al., 2002).

O sucesso na caracterização de genótipos com tolerância ao alumínio passa pela escolha do método e características avaliadas. No caso de poáceas, a literatura apresenta um consenso de que características baseadas no desenvolvimento do sistema radicular são os melhores critérios para a avaliação da tolerância (Coelho & Vestena, 2010).

Vários métodos de experimentação têm sido propostos para facilitar a identificação, em meio a um determinado pool gênico, de indivíduos superiores, com características morfológicas que conferem tolerância a níveis elevados de alumínio tóxico. O cultivo em solução nutritiva como metodologia para imposição de estresse por alumínio em milho tem possibilitado a elucidação de dúvidas no que diz respeito a interação do Al^{3+} com a planta e os mecanismos de tolerância desenvolvidos por genótipos superiores, uma vez que facilita a avaliação do sistema radicular sem o contato com o solo (Giannakoula et al., 2010; Garzón et al., 2011). Essa metodologia é favorecida, também, por não apresentar as desvantagens do trabalho em campo, o qual está sujeito às intempéries do meio ambiente, bem como a doenças e pragas, que interferem de forma negativa a precisão experimental (Echart & Cavalli-Molina, 2001).

A utilização do cultivo vegetal em solução nutritiva tem se mostrado muito usual em programas de melhoramento, por constituir um meio rápido e bastante eficiente, com a possibilidade de avaliação e seleção de um grande número de genótipos em pouco tempo (Crestani et al., 2013). Resultados encontrados por Boni et al. (2009), ao estudarem a herança da tolerância ao alumínio em linhagens de milho, ressaltam a eficácia dessa metodologia na seleção precoce de genótipos, cuja propiciou ganho de seleção superior a 32%. Paterniani & Furlani (2002) ao avaliarem a tolerância à toxicidade por alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva encontraram genótipos superiores em virtude, principalmente, de efeitos gênicos aditivos. Também Cançado et al. (2002), em avaliação de linhagens de milho quanto à tolerância ao alumínio, afirmaram ser os efeitos aditivos, proporcionalmente, mais acentuados do que os não-aditivos, na expressão da tolerância ao estresse, onde foi possível apontar linhagens a serem utilizadas como progenitores para formação de híbridos superiores.

Considerando-se que a tolerância ao alumínio nos vegetais é muito diversificada de acordo com a composição gênica (Rout et al., 2001), a utilização da variabilidade genética nos cruzamentos de grupos geneticamente divergentes representa uma importante estratégia para obter ganhos de seleção na busca por cultivares superiores (Benitez et al., 2011). A determinação da divergência genética para o melhoramento fornece parâmetros para a identificação de genótipos superiores e potenciais genitores para formação de populações segregantes (Bertan et al., 2006), através de técnicas de análise

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

multivariadas, com destaque para a eficiência e confiabilidade apresentada na análise por variáveis canônicas (Moreira et al., 2009).

Com base nestas considerações, objetivou-se com o presente trabalho a fenotipagem de genótipos de milho em condições de estresse por alumínio em solução nutritiva e sua correlação com a produtividade de grãos, visando avaliar o cultivo hidropônico como método de seleção precoce, além de quantificar a variabilidade genética dos híbridos em função da dissimilaridade genética e identificar híbridos promissores na seleção de progênies.

Material e Métodos

Em trabalho conduzido na Universidade Federal do Tocantins, no Campus Universitário de Gurupi (280 m de altitude e coordenadas 11°43'45" S e 49°04'07" W), em Gurupi – TO, foram realizados dois experimentos, em casa de vegetação e campo experimental, visando fenotipar genótipos de milho e determinar a produtividade de grãos, respectivamente. Foram avaliados 28 híbridos experimentais e 7 híbridos comerciais contudo, sem a adoção de testemunhas (Tabela 1).

Tabela 1. Relação de híbridos comerciais e experimentais avaliados em condições de estresse por alumínio, no município de Gurupi-TO.

Referência	Híbrido	Referência	Híbrido	Referência	Híbrido
1	AG 2040	13	UFT-6	25	UFT-18
2	AG 8060 YG	14	UFT-7	26	UFT-19
3	AG 1051	15	UFT-8	27	UFT-20
4	P 30F53 YG	16	UFT-9	28	UFT-21
5	IMPACTO TL	17	UFT-10	29	UFT-22
6	P 30F80	18	UFT-11	30	UFT-23
7	TRUCK TL	19	UFT-12	31	UFT-24
8	UFT-1	20	UFT-13	32	UFT-25
9	UFT-2	21	UFT-14	33	UFT-26
10	UFT-3	22	UFT-15	34	UFT-27
11	UFT-4	23	UFT-16	35	UFT-28
12	UFT-5	24	UFT-17		

As sementes dos 35 genótipos foram colocadas para germinar em papel de filtro, distribuídas 1,0 cm entre si. O papel foi enrolado e umedecido em água destilada. Estes rolos foram acondicionados em germinador à temperatura de 25ºC. Após 60 horas os rolos foram retirados do germinador e as plântulas foram selecionadas quanto à uniformidade. Posteriormente, essas plântulas foram acondicionadas individualmente em vasos plásticos.

No cultivo das plântulas de milho utilizou-se a metodologia do vaso duplo, adaptada de Cardoso et al. (2004), onde vasos plásticos de 0,5 dm³, contento areia lavada foram sobrepostos, com o auxílio de um suporte, a uma bandeja polietileno medindo 45 cm de comprimento, 30 cm de largura e 12,0 cm de profundidade, contendo solução nutritiva, com auxílio de suporte (Figura 1). Nos vasos duplos compartilhados (24 parcelas por bandeja), parte das raízes cresceu em meio líquido e parte em meio sólido, evitando a necessidade da aeração da mesma.

As plântulas foram irrigadas diariamente com solução nutritiva semelhante à definida por Furlani & Hanna (1984), cuja composição constituiu dos seguintes nutrientes (ppm): $N\text{-}NO_3$ = 137; P = 8; K = 141; Ca = 75; Mg = 17; Cl = 33; S = 54; Mn = 0,5; B = 0,3; Fe = 3,6. O estresse por alumínio foi simulado através da adição à solução nutritiva em uma única concentração de 3 mg L^{-1}, na forma de alumínio – potássico dodecaidratado ($AlK(SO_4)_2.12H_2O$).

Em intervalos de cinco dias foram realizadas as avaliações de altura da planta (AP), medida em centímetros, desde a base do solo ate o ápice da maior folha; o comprimento da raiz principal (CRP), medido em centímetros, desde a base do recipiente plástico até extremidade da raiz principal; o diâmetro do colmo (DC), medido em mm, com o uso de um paquímetro digital, no terço mediano colmo da planta; e o volume da raiz (VR) medido em mm³, determinado por meio da medição do deslocamento da coluna de água em proveta graduada, ou seja, colocando-se a porção do sistema radicular exposta à

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

solução nutritiva, em proveta contendo um volume conhecido de água. Pela diferença, obteve-se a resposta direta do volume de raízes, pela equivalência de unidades (1 mL = 1 mm^3), segundo metodologia descrita por Basso (1999).

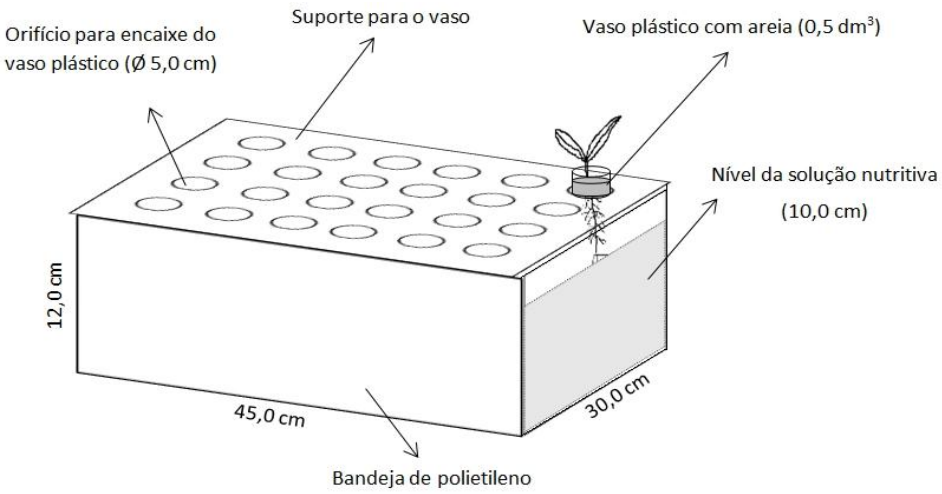

Figura 1. Ilustração do vaso duplo compartilhado, adaptado de Cardoso et al. (2004).

Após 25 dias decorridos da germinação, as plantas foram colhidas e separadas as raízes da parte aérea. Posteriormente foram identificadas e acomodadas em sacos de papel. Anotaram-se os dados referentes à massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa fresca da raiz (MFR), em gramas, e depois colocados em estufa a uma temperatura de 60°C, durante 72 horas até atingir massa constante. Após esse prazo foi realizada a pesagem do material visando a determinação da massa seca da raiz (MSR) e massa seca da parte aérea (MSPA), em gramas.

O experimento implantado em campo experimental foi realizado na safra 2012/2013, em solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com a seguinte composição físico-química: pH em H_2O = 5,16; M.O = 4,43 g dm^{-3}; P ($Melich^{-1}$) = 0,82 mg dm^{-3}; Ca = 0,82 $cmol_c$ dm^{-3}; Mg = 0,49 $cmol_c$ dm^{-3}; Al = 0,28 $cmol_c$ dm^{-3}; H+ Al = 3,43 $cmol_c$ dm^{-3}; K = 0,31 $cmol_c$ dm^{-3}; 66% de areia; 7,5% de sílte e 26,5% de argila.

Os genótipos foram semeados com o preparo de solo convencional, de modo a se obter uma população final de 70 mil plantas ha^{-1}, sob uma adubação de 500 kg ha^{-1} de formulado 05-25-15 + 5% Zn na linha de semeadura. Na adubação de cobertura foram usados 100 kg ha^{-1} de nitrogênio, empregando-se como fonte deste nutriente a ureia, ao estádio de quatro folhas completamente desenvolvidas. Foi avaliada a produtividade de grãos, obtida pela pesagem da massa de grãos da parcela, corrigida para 13% de umidade, e posteriormente convertida para kg ha^{-1}.

O experimento em casa de vegetação ocorreu em blocos casualizados, com quatro repetições, onde as parcelas foram constituídas de um vaso com uma planta. O experimento em campo ocorreu em blocos casualizados, com três repetições. A parcela experimental foi constituída de duas linhas de quatro metros de comprimento espaçada em 0,70 metros.

Para cada uma dessas características foram realizadas análises de variância e posteriormente realizado o teste de agrupamento Scott & Knott ($p<0,05$). Foram estimados coeficientes de correlação simples de Pearson ($p<0,05$) entre as características avaliadas nos dois experimentos, e posteriormente a representação gráfica dos genótipos a partir da característica morfológica de maior correlação com a produtividade de grãos. A hipótese de que o coeficiente de correlação Pearson é igual à zero (H0: 0) foi avaliada pelo teste t ($p<0,05$).

Para determinação da divergência genética foi efetuada análise multivariada, com a obtenção das variáveis canônicas e dispersão gráfica a partir da importância dos caracteres dos componentes principais.

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o Aplicativo Computacional em Genética e Estatística – Programa Genes versão Windows (Cruz, 2006).

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Resultados e Discussão

Na fonte de variação genótipo foi observada diferença significativa (p<0,01) em todas as características, confirmando, portanto, a existência de variabilidade entre os híbridos (Tabela 2). Observou-se que os resultados encontrados para as características avaliadas estão de acordo com o relatado na literatura da cultura do milho (Conceição et al., 2009).

Tabela 2. Resumo da análise de variância de características altura da planta (cm), volume da raiz (mm³), comprimento da raiz principal (cm), diâmetro do colmo (mm), massa seca da raiz e parte aérea (g), massa fresca de raiz e parte aérea (g) de 35 genótipos de milho, em experimento conduzido em casa de vegetação, sob estresse por alumínio, Gurupi-TO, 2013.

FV	GL	Quadrado Médio							
		AP	VR	CRP	DC	MSR	MSPA	MFR	MFPA
BLOCO	3	4,62	0,14	4,75	1,88	0,20	0,01	1,53	0,49
GNT	34	38,1**	157,5**	8471,5**	93,4**	6,0**	2,7**	188,9**	99,8**
RESÍDUO	102	5,36	8,93	663,96	42,93	2,16	0,68	31,40	9,54
Média		25,60	1,84	21,80	5,78	0,76	0,39	4,14	2,55
CV (%)		9,04	16,09	11,70	11,23	19,19	20,72	13,39	11,96

** significativo pelo teste F (p<0,01). GNT: Genótipos; AP: altura das plantas; VR: volume da raiz; CRP: comprimento da raiz principal; DC: diâmetro do colmo; MSR: massa seca da raiz; MSPA: massa seca da parte aérea; MFR: massa fresca da raiz; MFPA: massa fresca da parte aérea.

Quanto a altura de plantas (AP), as maiores médias foram obtidas pelos genótipos 5, 6, 22, 28 e 33, não diferindo estatisticamente entre si, destacando-se o genótipo 5 com média de 30,5 cm. Já os genótipos 2, 7, 19, 20 e 30 apresentaram as menores médias, não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 3). Tais resultados corroboram com Techio (2009) que, pesquisando o desenvolvimento de genótipos de milho cultivados em solução nutritiva com 3,5 mg L^{-1} de Al^{3+}, observou variabilidade na altura das plantas e a redução em genótipos sensíveis. De acordo com Martins et al. (2011) o alumínio, quando presente em grandes concentrações na solução do solo, pode conduzir à complexação de minerais, como fósforo, na superfície radicular, em formas não absorvíveis pela planta, impedindo sua assimilação. Comprometendo assim, o metabolismo vegetal e resultando em menor incremento na parte aérea.

Em relação ao volume de raízes (VR) as maiores médias foram obtidas pelos genótipos 6, 8, e 22 não diferindo estatisticamente entre si. Já os genótipos 2, 4, 7, 20, 25, 27 e 29 apresentaram as menores médias, não havendo diferenças significativas entre os mesmos. Visto que os incrementos na AP são reflexos dos níveis de danos do Al^{3+} sobre o sistema radicular, deve-se destacar o fato dos genótipos 6 e 22 permaneceram inclusos em grupos estatísticos com as maiores médias, tanto em AP, quanto VR. Da mesma forma, os genótipos 2, 7 e 20 estiveram fizeram presentes em grupos estatísticos com as menores médias AP e VR, evidenciando que a absorção de nutrientes e o crescimento vegetal é proporcional ao volume da solução ocupado pelas raízes (Horn et al., 2006).

As maiores médias de comprimento da raiz principal (CRP) foram obtidas pelos genótipos 6 e 29, não diferindo estatisticamente entre si. Já o genótipo 7 (0,48 cm) apresentou a menor média entre todos os genótipos. Observou-se o aparecimento de tonalidades castanhas, aspecto de corais e engrossamento dos ápices da raiz. Esses sintomas também foram relatados por Anjos (2007), em trabalho com milho submetido a concentrações crescentes de Al^{3+}. O genótipo 7 obteve seu desenvolvimento radicular comprometido, evidenciando uma maior sensibilidade ao alumínio tóxico, conforme afirmações de Matsumoto (2000), que observou, em raízes de poáceas submetidas a concentrações de alumínio em solução, uma imediata resposta metabólica, indicando que no primeiro momento o Al^{3+} inibe a expansão e elongação das células das raízes, e depois a divisão celular também passa a ser dificultada, com consequente inibição do crescimento e o desenvolvimento das raízes de genótipos sensíveis.

A magnitude de variação dos valores de diâmetro do colmo (DC) foi menor, em relação aos outros parâmetros. As maiores médias foram obtidas pelos genótipos 5, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 22, 23, 24,

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

25, 26, 28, 29, 33, 34 e 35, não havendo diferenças significativas entre eles. Novamente o genótipo 7 (2,95 mm) apresentou a menor média entre os genótipos.

Tabela 3. Altura da planta (cm), volume da raiz (mm³), comprimento da raiz principal (cm), diâmetro do colmo (mm), massa seca da raiz e parte aérea (g), massa fresca de raiz e parte aérea (g) de 35 genótipos de milho, em experimento conduzido em casa de vegetação, sob estresse por alumínio, Gurupi-TO, 2013.

GNT	AP	VR	CRP	DC	MSR	MSPA	MFR	MFPA
1	25,5 b[1/]	1,13 f	21,00 d	5,50 b	0,48 c	0,35 c	2,68 e	2,23 d
2	19,75 d	0,50 g	8,25 f	4,68 b	0,48 c	0,33 c	2,28 e	1,25 e
3	26,88 b	2,25 d	22,50 d	5,35 b	0,58 c	0,43 b	4,15 c	3,13 b
4	23,63 c	0,50 g	6,75 f	5,33 b	0,48 c	0,45 b	2,43 e	1,65 e
5	31,50 a	5,00 d	24,63 c	7,23 a	0,73 c	0,30 c	4,33 c	4,20 a
6	31,00 a	3,75 a	37,75 a	6,33 a	0,90 b	0,13 d	5,08 b	4,18 a
7	19,75 d	0,20 g	0,48 f	2,95 c	0,43 c	0,48 b	1,60 e	0,68 e
8	28,13 b	3,75 a	26,50 c	5,83 a	0,65 c	0,30 c	5,68 b	2,68 c
9	22,75 c	1,00 f	18,25 e	5,50 b	0,83 b	0,50 b	3,28 d	1,35 e
10	27,25 b	2,88 c	18,50 e	5,95 a	0,90 b	0,38 c	5,40 b	2,70 c
11	27,75 b	2,25 d	32,50 b	6,15 a	1,00 b	0,68 a	5,15 b	2,23 d
12	24,38 c	1,00 f	17,50 e	4,78 b	0,68 c	0,38 c	3,05 d	2,18 d
13	22,38 c	1,88 d	17,75 e	5,13 b	0,90 b	0,58 a	3,95 c	1,50 d
14	26,13 b	2,75 c	23,00 d	6,45 a	0,78 b	0,53 b	5,20 b	3,23 b
15	27,75 b	2,00 d	30,75 b	6,60 a	0,73 c	0,48 b	5,80 b	3,15 b
16	26,38 b	2,00 d	20,50 d	6,45 a	0,60 c	0,40 c	3,78 d	3,00 b
17	25,63 b	3,13 c	32,50 b	5,48 b	0,75 b	0,28 c	4,75 c	2,38 d
18	25,88 b	1,00 f	19,50 d	5,65 b	0,60 c	0,35 c	4,05 c	2,30 d
19	21,25 d	1,68 e	16,75 e	5,30 b	0,88 b	0,38 c	4,00 c	2,05 d
20	19,50 d	0,75 g	19,25 d	5,18 b	0,55 c	0,43 b	3,95 c	1,70 e
21	26,50 b	0,90 f	19,50 d	5,25 b	0,85 b	0,43 b	4,40 c	2,10 d
22	30,50 a	4,08 a	31,25 b	6,53 a	1,45 a	0,75 a	7,53 a	3,88 a
23	26,88 b	1,00 d	24,50 c	6,38 a	0,85 b	0,65 a	4,38 c	3,40 b
24	22,38 c	1,00 d	14,13 e	5,85 a	0,95 b	0,50 b	4,00 c	1,78 e
25	25,38 b	0,70 g	14,75 e	6,68 a	0,55 c	0,50 b	3,70 d	2,05 d
26	26,38 b	3,38 b	28,00 c	6,80 a	1,05 b	0,45 b	5,30 b	2,28 d
27	26,00 b	0,75 g	16,50 e	5,28 b	0,78 b	0,20 d	4,28 c	2,43 d
28	28,75 a	2,00 d	25,00 c	6,05 a	0,88 b	0,40 c	4,50 c	2,68 c
29	24,00 c	0,53 g	36,00 a	6,05 a	0,83 b	0,40 c	2,28 e	3,05 b
30	21,75 d	2,93 c	27,63 c	5,38 b	1,03 b	0,33 c	3,58 d	2,63 c
31	24,50 c	3,00 c	27,25 c	5,55 b	0,75 b	0,30 c	4,25 c	2,78 c
32	25,38 b	1,00 f	20,13 d	4,68 b	0,50 c	0,23 d	3,03 d	1,98 d
33	29,88 a	2,00 d	20,00 d	6,53 a	0,75 b	0,23 d	5,05 b	4,23 a
34	27,63 b	2,00 c	21,13 d	7,00 a	0,60 c	0,20 d	4,70 c	3,50 b
35	26,75 b	2,00 d	22,50 d	6,40 a	0,85 b	0,18 d	3,48 d	3,05 b

[1/]Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas colunas constituem grupo estatisticamente homogêneo, pelo teste Scott & Knott ($p<0,05$). GNT: Genótipos; AP: altura das plantas; VR: volume da raiz; CRP: comprimento da raiz principal; DC: diâmetro do colmo; MSR: massa seca da raiz; MSPA: massa seca da parte aérea; MFR: massa fresca da raiz; MFPA: massa fresca da parte aérea.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Os valores observados de massa seca da raiz (MSR) apresentaram pouca variação, uma vez que os genótipos 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 12, 15, 16, 18, 20, 25, 32 e 34 constituíram o mesmo grupo estatístico com as menores médias. Diferentemente, o genótipo 22, com 1,45 g, apresentou a maior média de massa seca da raiz entre os genótipos.

Os genótipos 11, 13, 22 e 23 obtiveram as maiores médias de massa seca da parte aérea (MSPA). Diferentemente, os genótipos 6, 27, 32, 33, 34 e 35 apresentaram as menores médias, não diferindo estatisticamente entre si. Estes resultados se aproximam aos encontrados por Durães et al. (2000) que, em avaliação de genótipos de milho tolerantes a toxidez de alumínio, separou seis grupos estatísticos com valores entre 0,58 e 0,29 g.

Na característica de massa fresca da raiz (MFR), observou-se diferença entre os valores obtidos pelos genótipos, onde o genótipo 22 sobressaiu entre os demais (7,53 g). Ao considerar que o mesmo genótipo apresentou as maiores médias também em MSPA, MSR e VR, pode-se apontá-lo como tolerante ao estresse por alumínio submetido, principalmente pelo maior desenvolvimento do sistema radicular. Silva et al. (2011) relaciona essa superioridade fisiológica em ambiente estressante à incrementos na absorção de nutrientes, acarretando em maior desenvolvimento da parte aérea, e a mecanismos de mudanças no pH da rizosfera de plantas tolerantes, ainda não totalmente esclarecidos. Já os genótipos 1, 2, 4, 7, e 29 apresentaram as menores médias de MFR, não diferindo estatisticamente entre si, destacando-se o genótipo 7 com média de 1,6 g.

As maiores médias de massa fresca da parte aérea (MFPA) foram obtidas pelos genótipos 5, 6 e 33 não diferindo significativamente entre si. O genótipo 7 destacou-se por apresentar a menor média (0,68 g). Pode-se relacionar este baixo valor ao fato do mesmo ter apresentado as menores médias de MFR e MSR, evidenciando maior sensibilidade ao Al^{3+} tóxico. Segundo Hartwig et al. (2007), a inibição do crescimento de raízes é tida como a principal causa da fitotoxidez do alumínio, resultando em menor volume de solo explorado pelas raízes da planta, reduzindo consequentemente, a nutrição mineral e a absorção de água. Em função da rápida reatividade do Al^{3+}, as injúrias podem ocorrer na parede celular, na membrana plasmática, no citoesqueleto e até no núcleo celular, oriundas de disfunções relacionadas com a homeostase e transporte do cálcio.

Pela análise multivariada, as estimativas dos autovalores correspondentes às duas primeiras variáveis canônicas representaram 73,29% da variação total (Tabela 4). Cruz et al. (2004) recomendam que no caso das duas primeiras variáveis não representarem o mínimo de 80% da variação total, torna-se necessário complementar a análise com a dispersão gráfica em relação à terceira ou até mesmo, a quarta variável canônica.

Tabela 4. Estimativas das variâncias (autovalores) e variâncias percentuais acumuladas das variáveis canônicas, visando estimar a dissimilaridade genética das características altura da planta, volume da raiz, comprimento da raiz principal, diâmetro do colmo, massa seca da raiz e parte aérea, massa fresca de raiz e parte aérea entre 35 genótipos de milho, em experimento conduzido em casa de vegetação, sob estresse por alumínio, Gurupi-TO, 2013.

Variáveis Canônicas	Variâncias (autovalores)	Variâncias (Acumuladas %)
VC1	50,61	50,61
VC2	22,68	73,29
VC3	11,81	85,10
VC4	5,77	90,87
VC5	3,41	94,28
VC6	2,54	96,82
VC7	1,99	98,81
VC8	1,19	100

Neste trabalho, como as três primeiras variáveis canônicas representaram 85,10% da variação total, os resultados de dispersão gráfica foram avaliados em relação às variáveis canônicas VC1, VC2 e VC3. Na Figura 2, observa-se que existe ampla distribuição dos genótipos no espaço tridimensional, e a formação de 13 grupos distintos. Assim, os genótipos mais distantes em relação ao conjunto foram 2, 4, 6, 7, 22 e 29. Por outro lado, os demais genótipos formam conjuntos mais

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

homogêneos no que diz respeito à divergência genética. Desta forma, são indicados os cruzamentos entre acessos que possuem altas médias para tolerância ao alumínio tóxico e estejam mais distantes no espaço tridimensional.

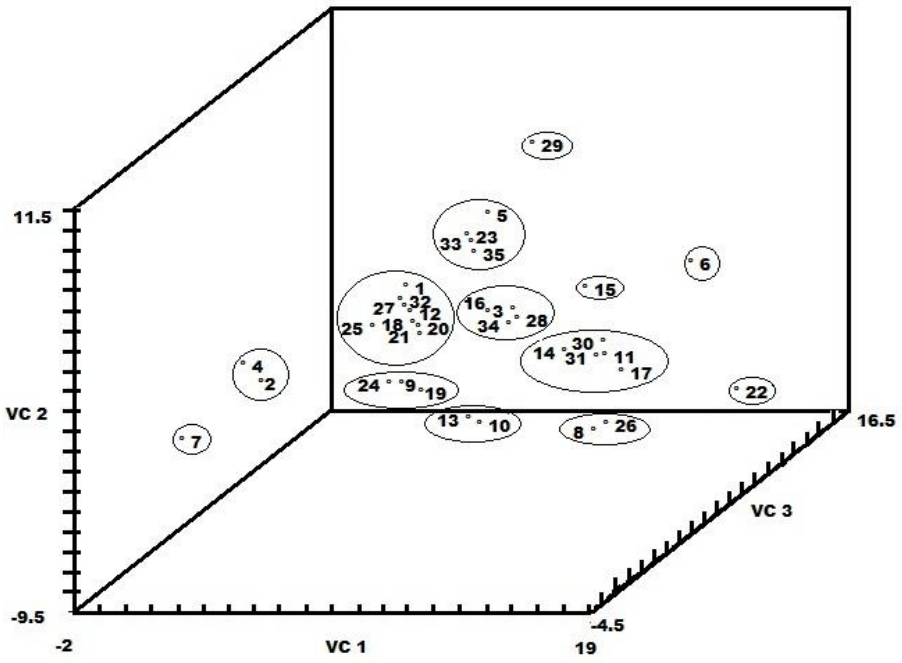

Figura 2. Dispersão gráfica dos escores em relação aos eixos representativos das variáveis canônicas (VC1, VC2 e VC3) de 35 genótipos de milho, em experimento conduzido em casa de vegetação, sob estresse por alumínio, Gurupi-TO, 2013.

Em programas de hibridação deve-se considerar, para boa estratégia de escolha, não apenas a diversidade genética, mas também o comportamento de tolerância ao Al tóxico de cada genótipo. Esse comportamento foi verificado nos genótipos 6, 22 e 29, que se destacaram pela diversidade em relação aos demais genótipos e pelo elevado índice de tolerância, o que os qualifica como promissores à serem utilizados em programas de melhoramento. Isso proporciona ao melhorista condições de seleção ampla com base em todas as características. Além disso, quando se correlaciona essas características com produtividade de grãos, a seleção pode ser realizada com uma maior probabilidade de acerto.

Na análise de correlação entre as características avaliadas em solução nutritiva com produtividade de grãos (PROD) em campo, constatou-se a ocorrência de correlação positiva e significativa entre PROD e MFPA (0,36) (Tabela 5). Vale-se ressaltar que MFPA apresentou correlação positiva e significativa com todas as características do sistema radicular (VR, CRP, MSR e MFR), confirmando a relação entre o alumínio tóxico e o metabolismo vegetal, onde genótipos sensíveis ao metal apresentam decréscimo nos parâmetros radiculares, acarretando em menor aproveitamento dos recursos no meio de cultivo, e, consequentemente, em menor acúmulo de massa na parte aérea (Gordin et al., 2013).

A partir da correlação significativa entre PROD e MFPA, realizou-se representação gráfica dos genótipos, onde é possível observar que todos os genótipos que apresentaram maiores PROD também apresentaram maiores MFPA (Figura 3). Essa informação é válida em programas de melhoramento genético voltados para o desenvolvimento de genótipos a serem inseridos em áreas degradadas com elevada acidez por alumínio, pois indica que a seleção de indivíduos tolerantes ao Al^{3+} com elevada produção de MFPA possibilita predizer ganhos de PROD.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Tabela 5. Matriz de correlação fenotípica entre as características produtividade de grãos, altura da planta, volume da raiz, comprimento da raiz principal, diâmetro do colmo, massa seca da raiz e parte aérea, massa fresca de raiz e parte aérea de 35 genótipos de milho, avaliados em solução nutritiva sob estresse por alumínio e cultivo em campo, Gurupi-TO, 2013.

	AP	VR	CRP	DC	MSR	MSPA	MFR	MFPA
PROD	0,17 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,36 *
AP	-	0,56 **	0,58 **	0,71 **	0,33 *	-0,12 ^{ns}	0,67 **	0,83 **
VR		-	0,62 **	0,49 **	0,56 **	-0,08 ^{ns}	0,77 **	0,58 **
CRP			-	0,57 **	0,54 **	-0,03 ^{ns}	0,58 **	0,65 **
DC				-	0,40 *	0,03 ^{ns}	0,61 **	0,75 **
MSR					-	0,37 *	0,65 **	0,35 *
MSPA						-	0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
MFR							-	0,59 **

^{ns} Não significativo, **significativo a p<0,01 e * a p<0,05 pelo teste t. PROD: Produtividade de grãos; AP: altura das plantas; VR: volume da raiz; CRP: comprimento da raiz principal; DC: diâmetro do colmo; MSR: massa seca da raiz; MSPA: massa seca da parte aérea; MFR massa fresca da raiz; MFPA: massa fresca da parte aérea.

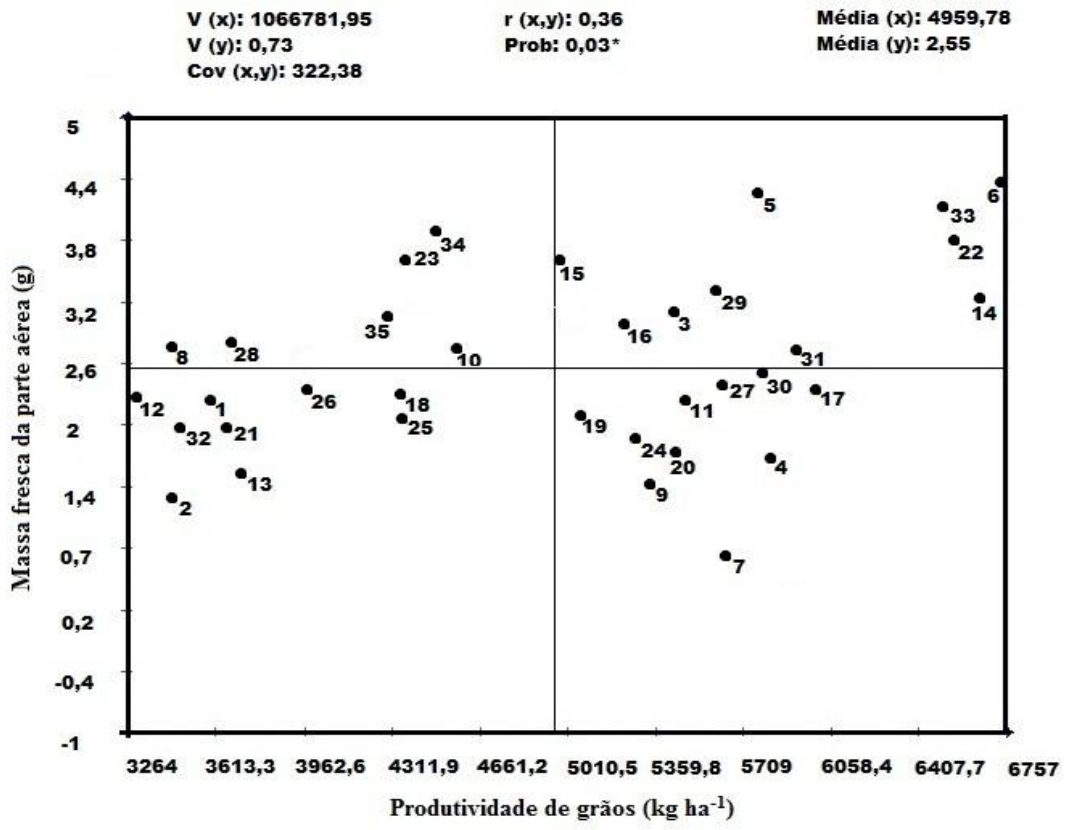

Figura 3. Distribuição gráfica de 35 genótipos de milho, em função da massa fresca da parte aérea sob cultivo em solução nutritiva e sua respectiva produtividade de grãos em campo, Gurupi-TO, 2013.

Observa-se parcial concordância entre os resultados da correlação e divergência genética, em que alguns dos genótipos que apresentaram maiores MFPA e PROD (Figura 3) permaneceram em grupos mais divergentes na dispersão gráfica (Figura 2). Mas, devido à distribuição gráfica da correlação considerar apenas duas características, enquanto a dispersão gráfica considera todas as características, não é possível selecionar os genótipos superiores, e sim, eliminar os genótipos sensíveis ao Al^{3+}, uma

vez que somente a identificação dos genótipos com maiores médias de MFPA e PROD não permite inferir sobre a divergência genética entre eles. Contudo, o genótipo ao apresentar baixas médias de MFPA e PROD estará automaticamente excluído de qualquer processo de seleção de indivíduos superiores, independente de sua dissimilaridade genética.

Com isto mostra-se válida a fenotipagem por cultivo em solução nutritiva como método de seleção precoce para tolerância ao Al^{3+}, onde é possível selecionar genótipos de milho quanto à característica de MFPA e obter uma predição de ganhos para PROD, resposta importante a programas de melhoramento que buscam por agilidade em resultados e otimização de recursos.

Conclusões

A fenotipagem por cultivo em solução nutritiva como método de seleção precoce para tolerância ao Al^{3+} possibilita a descriminação e exclusão dos genótipos sensíveis ao alumínio.

Os híbridos P 30F80, UFT-15 e UFT-22 são classificados como tolerantes ao estresse por alumínio, com desempenho superior quando cultivados, tanto em solução nutritiva, quanto em campo.

O híbrido TRUCK TL é classificado como sensível à condição estresse por alumínio.

Os híbridos P 30F80, UFT-15 e UFT-22 são promissores para obtenção de populações segregantes com variabilidade superior para tolerância ao alumínio tóxico, aliadas à elevada produtividade de grãos.

Referências

ANJOS, O.F. **Exsudação de ácido málico e alongamento radicular em genótipos de milho tratados com níveis tóxicos de alumínio.** 2007. 51 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BASSO, S.M.S. **Caracterização morfológica e fixação biológica de nitrogênio de espécies de Adesmia DC. e Lotus L.** Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 268 p. Tese (Doutorado em zootecnia), UFRGS, 1999.

BENITEZ, L.C.; RODRIGUES, I.C.S.; ARGE, L.W.P.; RIBEIRO, M.V.; BRAGA, E.J.B. Análise multivariada da divergência genética de genótipos de arroz sob estresse salino durante a fase vegetativa. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.2, p.409-416, 2011.

BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, J.A.G.; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; SILVA, G.; HARTWING, I.; VALÉRIO, I.P.; FINATTO, T. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, v.65, n.1, p.55-63, 2006.

BONI, T.A; PRIOLI, A.J.; PRIOLI, S.M.A.P.; LUCIO, L.C.; MELLO, R. Inheritance of aluminum tolerance in maize. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.9, p.147-153, 2009.

CANÇADO, G.M.A.; PARENTONI, S.N.; BORÉM, A.; LOPES, M.A. Avaliação de nove linhagens de milho em cruzamentos dialélicos quanto à tolerância ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.4, p.471-478, 2002.

CARDOSO, I.M.; BODDINGTON, C.L.; JANSSEN, B.H.; OENEMA, O.; KUYPER, T.W. Double pot and double compartment: Integrating two approaches to study nutrient uptake by arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v.260, p.301–310, 2004.

COELHO, C.H.M.; VESTENA, S. Avaliação de índices fenotípicos de milho à tolerância ao alumínio. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.17, p.44-55, 2010.

CRESTANI, M., SILVA, J.A.G.S.; TESSMANN, E.W.; SILVEIRA, S.F.; NORNBERG, R.; RIBEIRO, G.; CARVALHO, F.I.F; OLIVEIRA, A.C. Protocolos para seleção quanto à tolerância ao alumínio em aveia sob cultivo hidropônico. **Current Agricultural Science and Technology**, v.17, n.3, p.311-320, 2013.

CONCEIÇÃO, L.D.H.C.S.; TESSELE, C.; NETO, J.B. Diallel analysis and mapping of aluminum tolerance in corn inbred lines. **Maydica**, v.54, n.1, p.55-61, 2009.

CRUZ, C.D. **Programa Genes: Estatística experimental e matrizes**. Viçosa: UFV, 2006.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2004. p.171-201.

DURÃES, F.O., OLIVEIRA, A.C., ALVES, V.M. Avaliação de genótipos de milho para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva: Relação da precocidade de emissão da raiz primária e índice fenotípico. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 23, 2000. **Anais...** Uberlândia: Embrapa, 2000. p.139-146.

ECHART, C.L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Revista Ciência Rural**, v.31, n.3, p.531-541, 2001.

FURLANI, P.R.; HANNA, L.G. Avaliação da tolerância de plantas de arroz e milho ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, n.2, p.205-208, 1984.

GALON, L.; TIRONI, S.P.; DA ROCHA, A.A.; SOARES, E.R.; CONCENÇO, G.; ALBERTO, C.M. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v.4, n.3, p.18-38, 2011.

GARZÓN, T.; GUNSÉ, B.; MORENO, A.R.; TOMOS, A.D.; BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Aluminium-induced alteration of ion homeostasis in root tip vacuoles of two maize varieties differing in Al tolerance. **Plant Science**, v.180, p.709–715, 2011.

GIANNAKOULA, A.; MOUSTAKAS, M.; SYROS, T.; YUPSANIS, T. Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line. **Environmental and Experimental Botany**, v.67, p.487–494, 2010.

GORDIN, C.R.B.; MARQUES, R.F., ROSA, R.J.M.; DOS SANTOS, A.M.; SCALON, S.D.P.Q. Emergência de plântulas e crescimento inicial do pinhão manso exposto a alumínio. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.1, p.147-156, 2013.

HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALÉRIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.N.R.; REIS, C.E.S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.28, p.219-228, 2007.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.30, p.77-85, 2006.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009.

MARTINS, C.E.; MIGUEL, P.S.B.; ROCHA, W.S.D.; SOBRINHO, F.S.; GOMES, F.T.; OLIVEIRA, A.V. Seleção de genótipos de Brachiaria Ruziziensis quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. I: Resposta a diferentes concentrações de alumínio e valores de ph em solução nutritiva. **Revista de Ciências Agrárias**, v.34, n.1, p.154-162, 2011.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminium toxicity and tolerance in higher plants. **International Review of Cytology**, v.200, p.11-23, 2000.

MOREIRA, R.M.P.; FERREIRA, J.F.; TAKAHASHI, L.S.A.; VASCONCELOS, M.E.C.; GEUS, L.C.; BOTTI, L. Potencial agronômico e divergência genética entre genótipos de feijão-vagem de crescimento determinado. **Semina: Ciências Agrárias**, v.30, n.1, p.1051-1060, 2009.

PATERNIANI, M.E.A.G.; FURLANI, P.R. Tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva. **Bragantia**, v.61, n.4, p.11-16, 2002.

ROUT, G.R.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminum toxicity in plants: a review. **Agronomie**, v.21, p.3-21, 2001.

SÁVIO, F.L., TEIXEIRA, G.C.D.S., TEIXEIRA, I.R., MOTA, J.H., SILVA, A.G.D. Calagem e gessagem na nutrição e produção de soja em solo com pastagem degradada. **Revista Agrotecnologia**, v.2, n.1, 19-31, 2012.

SILVA, L.M.; COSTA, N.V.; CRUSCIOL, C.A.C; VIEGAS, P.R.A. Sistema radicular de cultivares de

arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva. **Agrarian**, v.4, n.13, p.202-212, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 722 p

TECHIO, J.W. **Crescimento de milho em solução com alumínio e produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular.** 2009. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.