

PROTOSCOLOS PARA SELEÇÃO QUANTO À TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM AVEIA SOB CULTIVO HIDROPÔNICO

PROTOCOLS FOR ALUMINUM TOLERANCE IN WHITE OAT UNDER HYDROPONIC CULTIVATION

Maráisa Crestani¹; José Antonio Gonzáles da Silva^{2*}; Elisane Webber Tessmann³; Solange Ferreira da Silveira Silveira⁴; Rafael Nornberg⁴; Guilherme Ribeiro⁵; Fernando Irajá Félix Carvalho⁶; Antônio Costa de Oliveira⁶.

RESUMO

Os protocolos conduzidos em condições hidropônicas têm sido adotados na identificação de plantas tolerantes e sensíveis ao alumínio (Al) nas diferentes espécies agrícolas, possibilitando a avaliação não destrutiva, em estádios iniciais de desenvolvimento, obtendo-se resultados altamente correlacionados aos observados em condições de campo. No entanto, o aprimoramento constante dos protocolos se faz necessário no sentido de otimizar a eficiência do processo de seleção. Logo, o objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento de cultivares de aveia branca consideradas sensíveis e tolerantes ao Al quando submetidas a diferentes protocolos e doses de Al a fim de validar a eficiência destas metodologias de avaliação. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com três repetições, adotando três protocolos de avaliação: 1) solução nutritiva completa, com Al na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ nas doses 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} ; 2) solução nutritiva completa com Al disponibilizado no sal $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ nas doses 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} de Al; 3) solução nutritiva mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ nas doses 0, 1, 3 e 5 mg L^{-1} . Os protocolos caracterizados pela adoção de Al na solução nutritiva completa nas fontes $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ foram eficientes na identificação de genótipos de aveia branca tolerantes e sensíveis ao Al tóxico.

Palavras-chave: *Avena sativa* L., solução nutritiva, comprimento de raiz, eficiência de seleção.

ABSTRACT

The protocols conducted in hydroponic conditions have been adopted in the identification of plants tolerant to aluminum (Al) in different crop species, allowing nondestructive evaluation in early development stages, with results highly correlated with those observed in field conditions. However, the constantly protocols improvement is necessary in order to optimize the efficiency of the selection process. Therefore, the objective was to evaluate the performance of white oat cultivars sensitive and tolerant to Al when exposed to different doses of Al and protocols in order to validate the efficiency of these evaluation methodologies. The experiment was a completely randomized design with three replications, adopting three evaluation protocols: 1) complete nutrient solution with Al provided as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ at doses 0, 8, 16 and 32 mg L^{-1} ; 2) complete nutrient solution with Al supplied as $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ at doses 0, 8, 16 and 32 mg L^{-1} Al; 3) minimal nutrient solution with Al provided as $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ at doses 0, 1, 3 and 5 mg L^{-1} . The protocols characterized by the adoption of Al in nutrient complete solution supplied as $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ and $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were efficient in identifying white oat genotypes tolerant to Al toxicity.

Key words: *Avena sativa* L., nutrient solution, root length, selection efficiency.

¹Doutoranda em Agronomia, área de concentração Fitomelhoramento, Faculdade de Agronomia 'Eliseu Maciel', Universidade Federal de Pelotas (FAEM/UFPEL), Pelotas/RS.

^{2*}Professor de Departamento de Estudos Agrários, Curso de Agronomia, Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJU). E-mail: jagsfaem@yahoo.com.br.

³Graduanda em Agronomia, Faculdade de Agronomia 'Eliseu Maciel', Universidade Federal de Pelotas (FAEM/UFPEL), Pelotas/RS.

⁴Mestrando em Agronomia, área de concentração Fitomelhoramento, Faculdade de Agronomia 'Eliseu Maciel', Universidade Federal de Pelotas (FAEM/UFPEL), Pelotas/RS.

⁵Doutorando em genética e Melhoramento, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG.

⁶Professor do Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia 'Eliseu Maciel', Universidade Federal de Pelotas (FAEM/UFPEL), Pelotas/RS.

(Recebido para publicação em 05/04/2011, Aprovado em 16/11/2011)

INTRODUÇÃO

O caráter tolerância ao alumínio (Al) tem recebido grande atenção durante o processo de seleção de novas constituições genéticas de aveia branca em populações segregantes, uma vez que quando cultivada em solos ácidos com altos teores de Al livre na solução, apresenta grande dificuldade no desenvolvimento, com reflexos significativos na produtividade de grãos (FLOSS & BAIER, 1979; FLOSS et al., 1983).

Vários mecanismos de tolerância ao Al em plantas vêm sendo postulados, classificando-os em dois grupos: i) mecanismos de exclusão ou apoplástico, com a imobilização ou neutralização do Al externamente à célula impedindo sua entrada e; ii) mecanismos simplásticos, decorrentes da imobilização ou neutralização do Al dentro da célula, inativado por enzimas específicas ou isolado no interior do vacúolo (JO et al., 1997). Vários estudos têm tido como foco a inativação do Al pela atuação dos mecanismos apoplásticos, pela exsudação de ácidos orgânicos na rizosfera em decorrência do Al presente no ambiente de cultivo, onde genótipos considerados tolerantes possuem maior capacidade em reconhecer a presença do íon tóxico no meio e iniciar a produção e liberação destes compostos complexantes (LI et al., 2000; ZHAO et al., 2003; MA et al., 2004). Segundo Fleming & Foy (1968), a tolerância das plantas ao Al está relacionada à capacidade de continuidade da divisão e alongação celular sob condições de estresse, modificação do ambiente radicular pela complexação do íon metálico e, conseqüente redução da concentração de Al no ambiente, mantendo áreas meristemáticas viáveis para formação de novos tecidos.

O Al se faz presente predominantemente na região radicular da planta, sendo os ápices das raízes seu sítio crítico de toxicidade (RYAN et al., 1993). De acordo com Machado (1997), quando este cátion é absorvido ocorre a paralisação da divisão celular no meristema apical das raízes, resultando em drástica redução do seu crescimento, com conseqüente menor eficiência na absorção de nutrientes pela planta e maior sensibilidade a estresses hídricos. Desta forma, a restrição do crescimento radicular tem sido adotada como um caráter eficiente na avaliação da toxicidade ao Al (CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; RYAN et al., 1993; MAZZOCATO et al., 2002; VOSS et al., 2006; CRESTANI et al., 2009).

A avaliação da tolerância ao Al em plantas realizada em condições de campo possibilita a maior representatividade das condições naturais de cultivo, no entanto, sua eficiência pode ser diminuída em virtude de vários fatores de difícil controle e mensuração que atuam sobre o desempenho das plantas (FERREIRA et al., 2006; VOSS et al., 2006). Desta maneira, o cultivo hidropônico tem sido empregado no sentido de facilitar os trabalhos pelo

maior controle de ambiente e facilidade de visualização do efeito específico do Al sobre o caráter de interesse, além de evidenciar elevada correlação com resultados obtidos em condições de campo (CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; BAIER et al., 1995; SOUZA, 2001; SPEHAR & SOUZA, 2006). Aliado a isto, permite avaliação de um grande número de genótipos em reduzido período de tempo em estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, proporcionando ganhos significativos à eficiência de seleção (CRESTANI, et al., 2009).

Vários métodos baseados no uso de soluções nutritivas em condições de hidroponia têm sido desenvolvidos para a avaliação da tolerância e sensibilidade ao Al em espécies anuais. Entre eles, o método proposto por Camargo & Oliveira (1981) tem sido largamente adotado na avaliação de cereais de estação fria, inclusive com a cultura da aveia (SÁNCHEZ-CHÁCON et al., 2000; SILVA et al., 2006; SILVA et al., 2007a; FINATTO et al., 2007; CRESTANI et al., 2009). Este protocolo se caracteriza pela combinação de uma série de componentes químicos essenciais à planta, formando uma solução nutritiva completa, associado ao emprego do sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ como fonte deste elemento. Metodologias que envolvem soluções nutritivas mínimas também vêm sendo empregadas, as quais são formadas pela adição de Al a uma solução contendo unicamente cálcio (Ca^{2+}) diluído em água destilada, e têm apresentado grande eficiência de avaliação na cultura do milho (*Zea mays* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) e soja (*Glycine max* L. Merr.) (MAZZOCATO et al., 2002; FREITAS et al., 2006; SPEHAR & SOUZA, 2006). O Ca é adicionado para evitar a desestabilização do pH, acelerar o desenvolvimento radicular e aumentar a absorção do Al (GARLAND et al., 1990).

O aprimoramento constante dos protocolos se faz necessário no sentido de otimizar a eficiência do processo de avaliação e seleção de genótipos tolerantes ao alumínio. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento de cultivares de aveia branca consideradas sensíveis e tolerantes ao Al quando submetidas a diferentes protocolos e doses de Al a fim de validar a eficiência destas metodologias de avaliação.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram testadas cinco cultivares de aveia branca recomendadas para cultivo no sul do Brasil, representando genótipos padrões quanto a tolerância e sensibilidade ao Al de acordo com trabalhos da literatura: ALBASUL e UPF 18 – sensíveis; UPFA 22 - tolerância intermediária; URS 20 e UFRGS 14 - tolerantes (FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com três repetições, sendo a unidade experimental constituída por dez plântulas. As sementes dos genótipos foram submetidas à germinação em caixas gerbox com papel germiteste em câmara de crescimento à 25°C por 72 horas. Sementes uniformes germinadas com 5 mm de raiz foram transferidas para telas acondicionadas sobre recipientes plásticos contendo 1,5 L de solução nutritiva padrão (ausência de Al). Entre os protocolos testados, dois se caracterizaram pela utilização de solução nutritiva completa (SC) com a adoção da técnica de avaliação estabelecida por Camargo & Oliveira (1981), solução nutritiva formada pelas seguintes substâncias ($\mu\text{mol L}^{-1}$): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 4000; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2000; KNO_3 – 4000; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 435; KH_2PO_4 – 500; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 2; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0,3; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,8; NaCl – 30; Fe-EDTA – 10; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,10; H_3BO_3 – 10. Ao completar 48 horas em solução nutritiva completa padrão, as telas com as plântulas foram transferidas para os recipientes de mesmo volume contendo as soluções tratamento, formadas pela décima parte da solução padrão, omitindo o fósforo e adicionando ferro na forma FeCl_3 . Para a inclusão das doses de Al, foi empregado como fonte o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, na quantidade requerida para atingir as concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} do elemento químico (equivalente a 0; 296; 592 e 1.185 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente). O segundo protocolo também foi constituído pela adoção de solução nutritiva completa, tendo como modificação a fonte de Al, no qual foi empregado o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, adicionado nas concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} de Al nas soluções tratamento (equivalente a 0; 296; 592 e 1.185 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al). O terceiro protocolo foi caracterizado pela utilização de solução nutritiva mínima (SM), composta por água destilada e 22 mg L^{-1} de Ca (equivalente a 540 μmol de Ca) fornecido na fonte $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Neste terceiro protocolo, as plântulas permaneceram por 48 horas em solução mínima padrão, sendo posteriormente transferidas para recipientes contendo as soluções tratamento, compostas pela décima parte da solução padrão e adição de 0, 1, 3 e 5 mg L^{-1} de Al, fornecido pela fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (equivalente a 0; 37; 111 e 185 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente).

Nas três metodologias testadas às plântulas permaneceram por 48 horas nas soluções tratamento e após este período, retornaram aos recipientes contendo solução nutritiva padrão, onde foram mantidas por mais 72 horas. O pH das soluções foi corrigido diariamente para $4,0 \pm 0,3$ com adição de HCl e/ou

NaOH 1 mol L^{-1} , com os recipientes mantidos em “banho-maria” ($26 \pm 1^\circ\text{C}$) no tanque de hidroponia. Na condução do experimento, as plantas receberam aeração constante das raízes e fotoperíodo de 24 h, com intensidade luminosa de 1.700 lux. Decorridos sete dias (168 h) de condução do experimento, foi realizada a avaliação das plântulas por meio da mensuração do comprimento total da raiz principal (CR), em centímetros. Os dados foram submetidos à análise de variância com a finalidade de identificar os efeitos simples e as interações. Para a interpretação do comportamento dos genótipos nos distintos protocolos e doses de Al foi efetuado o ajuste de regressão polinomial e comparação de médias por Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade de erro. Em cada protocolo testado foi calculada a herdabilidade (h^2) do caráter comprimento da raiz principal, em porcentagem, através do quadrado médio esperado [E(QM)], conforme modelo descrito por Carvalho et al. (2001), no intuito de auxiliar na eleição dos protocolos mais eficientes em identificar os genótipos de aveia branca sensíveis e tolerantes ao Al. Os procedimentos de análise de variância e ajuste de regressão polinomial foram realizados no programa computacional Sas Learning Edition (2002), enquanto que o teste de comparação de médias por Scott-Knott e o cálculo da herdabilidade foram efetuados utilizando o programa computacional GENES (CRUZ, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância detectou a existência de interação entre os fatores dose e genótipo para o comprimento total da raiz das cultivares de aveia branca nos três protocolos adotados, exigindo, portanto, a avaliação do comportamento dos distintos genótipos perante as doses de Al em cada protocolo adotado. Efeitos simples significativos para as fontes de variação dose e genótipo foram constatados com o cultivo dos genótipos em solução nutritiva completa (SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e SC AlCl_3), enquanto que, com o cultivo em solução mínima (SM AlCl_3) não foi possível constatar efeitos significativos em relação ao fator de tratamento dose (Tabela 1). Ainda, o protocolo solução mínima proporcionou o menor desempenho médio geral dos genótipos e o maior coeficiente de variação em relação à adoção da solução nutritiva completa. Este fato pode ser explicado pela ausência dos macro e micronutrientes essenciais na solução de cultivo mínima, tornando o ambiente de cultivo mais restritivo, interferindo no desenvolvimento e crescimento dos tecidos.

Tabela 1. Resumo da análise de variância para o caráter comprimento total da raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos a diferentes protocolos de avaliação quanto à sensibilidade ao Al em cultivo hidropônico. UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Fonte de Variação	GL	Quadrado médio – Comprimento total da raiz (cm)		
		SC Al ₂ (SO ₄) ₃	SC AlCl ₃	SM AlCl ₃
Dose (D)	3	5,64 ^{**}	9,19 ^{**}	0,62 ^{ns}
Genótipo (G)	4	19,65 ^{**}	11,72 ^{**}	32,53 ^{**}
D x G	12	1,05 [*]	0,84 [*]	0,98 [*]
Erro	40	0,51	0,32	0,39
Média Geral	-	5,05	3,95	3,51
CV%	-	14,20	14,41	16,38

^{*}Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro, respectivamente; ns= Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro; GL = Graus de liberdade; SC Al₂(SO₄)₃= Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte Al₂(SO₄)₃.18H₂O; SC AlCl₃= Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O; SM AlCl₃= Protocolo com solução mínima, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O; CV% = Coeficiente de variação, em porcentagem.

De acordo com trabalhos desenvolvidos na cultura do arroz (FREITAS et al., 2006), milho (MAZZOCATO et al., 2002), e soja (SPEHAR & SOUZA, 2006), as concentrações de Al eficientes para a diferenciação entre genótipos sensíveis e tolerantes ao Al em soluções nutritivas mínimas estão compreendidas no intervalo de 2 a 6 mg L⁻¹ de Al, enquanto que as doses 10 e 20 mg L⁻¹ de Al são citadas como eficientes na avaliação de genótipos de aveia em metodologias baseadas em soluções completas (SÁNCHEZ-CHÁCON et al., 2000; FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a; CRESTANI et al., 2009), justificando os intervalos de doses adotadas nesta avaliação. Assim, foi ajustado regressões polinomiais para explicar o comportamento dos genótipos nas distintas doses de Al, considerando cada protocolo (Figura 1).

No protocolo caracterizado pelo uso de solução nutritiva completa (SC), com o Al fornecido como Al₂(SO₄)₃.18H₂O (Figura 1.a), o genótipo UFRGS 14, considerado tolerante, manifestou redução de 0,58 mm neste caráter a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado, expressando elevado comprimento de raiz na concentração mais elevada (4,52 cm na dose 32 mg L⁻¹ de Al), como também na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo (6,38 cm) (Figura 1.a.2). Em relação a cultivar de aveia branca URS 20 (Figura 1.a.1), também tolerante, o comprimento mínimo da raiz (5,96 cm) foi expresso na concentração de 21,33 mg L⁻¹ de Al, com diminuição do comprimento da raiz de 1,24 mm a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado até atingir a dose crítica. Para o genótipo UPFA 22, de

tolerância intermediária, este mesmo comportamento foi observado na dose 18,00 mg L⁻¹ (3,48 cm), enquanto que a cultivar UPF 18 (sensível), demonstrou comprimento da raiz mínimo na dose crítica de 20,59 mg L⁻¹ de Al (3,74 cm), com a redução de 0,66 e 0,78 mm respectivamente a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado até atingir a dose crítica (Figuras 1.a.3 e 1.a.4).

Inferências até aqui efetuadas concordam com os valores médios apresentados na Tabela 2, pois na representação das regressões polinomiais é possível observar que a cultivar URS 20 apresentou os maiores comprimentos da raiz inicial e final (CR na dose crítica), seguido da UFRGS 14, UPFA 22 e UPF 18. A constituição genética ALBASUL, caracterizada como sensível ao Al, expressou reduzido desenvolvimento, tanto na dose zero quanto nas maiores concentrações do Al; contudo, não evidenciou mudança de comportamento em relação à presença do elemento tóxico nesta situação de cultivo (Figura 1.a.5).

No protocolo com uso de solução nutritiva completa (SC) e Al fornecido como AlCl₃.6H₂O (Figura 1.b), a cultivar de aveia branca URS 20 (Figura 1.b.1), tolerante, apresentou comprimento mínimo da raiz na concentração de 20,87 mg L⁻¹ de Al (3,90 cm). O genótipo UPFA 22 (Figura 1.b.3), de tolerância intermediária, demonstrou tal comportamento na dose 22,66 mg L⁻¹ (2,73 cm), enquanto que para a cultivar UPF 18 (Figura 1.b.4), o comprimento de raiz mínimo foi verificado na dose crítica de 21,67 mg L⁻¹ (1,96 cm), com a redução de 0,96, 1,13 e 1,01 mm, respectivamente, a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado até cada cultivar atingir a dose crítica.

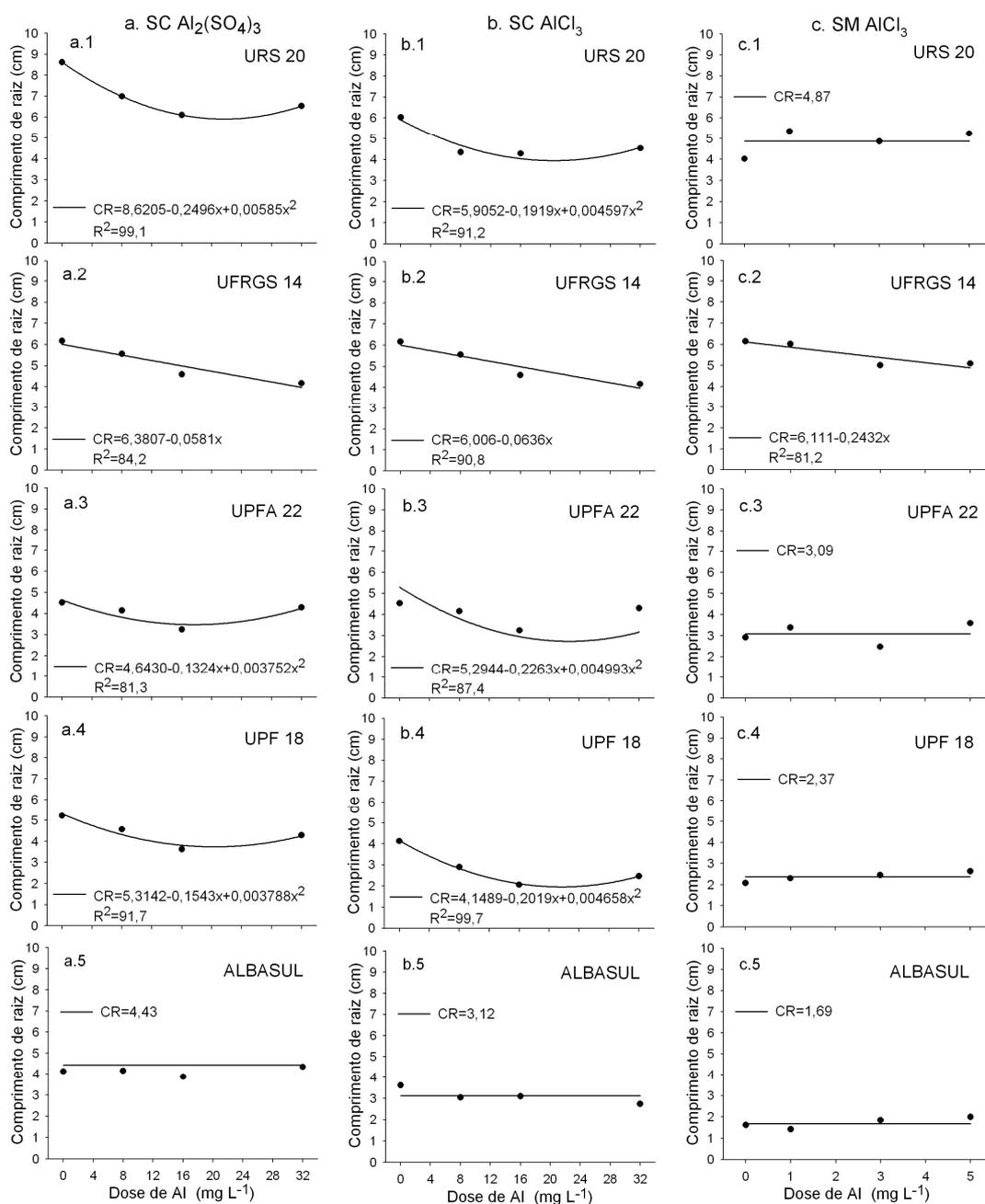


Figura 1. Representação das equações de regressão ajustadas pelo comportamento dos genótipos de aveia branca para o caráter comprimento total da raiz (CR) quando submetidos a diferentes protocolos de avaliação quanto à sensibilidade ao Al em cultivo hidropônico (a. SC Al₂(SO₄)₃ - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte Al₂(SO₄)₃.18H₂O; b. SC AlCl₃ - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O; c. SM AlCl₃ - solução nutritiva mínima, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O). UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Tabela 2. Análise de médias para o caráter comprimento total da raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio proporcionado por diferentes protocolos e doses do elemento tóxico em solução nutritiva. UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Dose de Al (mg L ⁻¹)	Nível de tolerância	Genótipo	Protocolo		
			SC Al ₂ (SO ₄) ₃	SC AlCl ₃	SM AlCl ₃
0	Tolerante	URS 20	7,62 a	6,53 a	4,02 a
		UFRGS 14	6,69 b	6,17 a	6,14 b
	Intermediário	UPFA 22	4,82 c	5,49 a	2,92 c
		UPF 18	5,01 c	4,12 b	2,07 d
1	Tolerante	URS 20	6,99 a	4,35 b	5,35 a
		UFRGS 14	5,80 a	5,55 a	6,02 a
	Intermediário	UPFA 22	4,14 b	3,27 c	3,38 b
		UPF 18	4,56 b	2,90 c	2,30 c
2	Tolerante	URS 20	6,10 a	4,28 a	4,85 a
		UFRGS 14	5,02 a	4,58 a	5,00 a
	Intermediário	UPFA 22	3,25 b	3,35 b	2,47 b
		UPF 18	3,63 b	2,06 c	2,45 b
3	Tolerante	URS 20	6,53 a	4,53 a	5,24 a
		UFRGS 14	4,77 b	4,16 a	5,09 a
	Intermediário	UPFA 22	4,29 b	3,10 b	3,59 b
		UPF 18	4,29 b	2,47 b	2,64 b
Sensível	ALBASUL	4,35 b	2,73 b	1,89 b	

* Dose 0= equivalente a 0 mg L⁻¹ de Al para os três protocolos trabalhados; Dose 1= equivalente à 8,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos caracterizado pela adoção de solução nutritiva completa (SC), e equivalente à 1,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima (SM); Dose 2= equivalente à 16,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos para os protocolos caracterizado pela adoção de solução nutritiva completa (SC), e equivalente à 3,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima (SM); Dose 3= equivalente à 32,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos para os protocolos caracterizado pela adoção de solução nutritiva completa (SC), e equivalente à 5,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima (SM). Médias do caráter seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

O genótipo UFRGS 14 (Figura 1.b.2) manifestou a redução de 0,64 mm no comprimento total da raiz a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado na solução de cultivo, expressando o maior comprimento da raiz entre os genótipos avaliados neste protocolo na concentração mais elevada (3,97 cm na dose 32 mg L⁻¹ de Al), como também na ausência do elemento tóxico (6,01 cm). O maior comprimento médio da raiz inicial e final (dose crítica) foi verificado para a cultivar UFRGS 14, seguido dos genótipos URS 20, UPFA 22 e UPF 18 (Tabela 2). Da mesma maneira, a cultivar ALBASUL (Figura 1.b.5) expressou o menor comprimento de raiz na dose zero, não evidenciando mudança de desempenho neste caráter ao longo da adição do Al na solução nutritiva, característica de um genótipo tolerante ao estresse testado.

No terceiro protocolo, formado pela solução mínima (SM) e Al adicionado como AlCl₃.6H₂O (Figura 1.c), os genótipos de aveia branca se comportaram de forma diferenciada em relação aos dois protocolos anteriores, visto que, apenas a cultivar UFRGS 14 (Figura 1.c.2) demonstrou resposta significativa à presença do elemento tóxico no meio de cultivo, com a

diminuição do comprimento da raiz no decorrer da adição de Al na solução, representada por uma equação linear, enquanto que, os demais genótipos não expressaram sintomas significativos de toxidez com a elevação da concentração de Al com base no comprimento total da raiz. A cultivar UFRGS 14 apresentou redução de 0,38 mm neste caráter a cada 1 mg L⁻¹ de Al adicionado na solução, no entanto, em relação às demais cultivares avaliadas, apresentou o maior comprimento de raiz na concentração mais elevada de Al (4,90 cm na dose 32 mg L⁻¹ de Al), e também na ausência do elemento tóxico na solução (6,11 cm), seguido pelas cultivares URS 20, UPFA 22, UPF 18 e a ALBASUL, que novamente evidenciou o menor desempenho médio para o caráter (Tabela 2).

A classificação dos genótipos de aveia branca adotados nesta avaliação como padrões quanto à tolerância ao Al realizada nos trabalhos de Finatto et al. (2007) e Silva et al. (2007a, b) foi efetuada com base no caráter retomada de crescimento da raiz. A retomada de crescimento da raiz caracteriza a capacidade do genótipo retomar seu desenvolvimento após os danos sofridos pela ação do elemento tóxico

(CAMARGO & OLIVEIRA, 1981). Segundo Silva et al. (2006) e Bertan et al. (2006) representa o critério mais efetivo de caracterização de genótipos quanto a tolerância e sensibilidade ao Al, pois possibilita a distinção das constituições genéticas em um maior número de classes fenotípicas em comparação às avaliações efetuadas com base no caráter comprimento total da raiz. Contudo, o caráter comprimento total da raiz representa uma medida mais direta, menos trabalhosa e menos vulnerável à ocorrência de erros de mensuração em relação à retomada do crescimento de raiz.

A presença do Al na solução nutritiva mínima, nas condições de cultivo adotadas, não foi eficiente em promover modificações nas plântulas ao ponto de interferir no comprimento das raízes, o que é confirmado pelo insucesso do ajuste de regressão polinomial para explicar o comportamento dos genótipos para esta variável, com exceção da cultivar UFRGS 14 (Figura 1.c). Por outro lado, a utilização deste protocolo de avaliação merece atenção, pois constitui uma técnica que permite economia de reagentes em relação às soluções completas e agilidade na confecção das soluções nutritivas, sendo que o ajuste desta técnica poderá trazer ganhos efetivos quanto à qualidade de sua aplicação em avaliações e seleção de genótipos de aveia branca tolerantes ao Al.

A ausência dos macro e micronutrientes essenciais na solução de cultivo mínima podem ter comprometido o crescimento das raízes a tal ponto que a presença do elemento tóxico não tenha sido o fator responsável por este comportamento. As reservas de nutrientes na semente são capazes de garantir a sobrevivência inicial das plântulas, mas no decorrer do avanço do processo germinativo ocorre a redução destas reservas pela formação dos tecidos do vegetal (FLOSS, 2006), necessitando de nutrientes exógenos para a continuação do desenvolvimento e crescimento das plântulas, inexistentes na solução nutritiva mínima. Vale destacar que nesta solução o Ca e o Al são os únicos cátions presentes, e como a absorção de um elemento químico depende diretamente de sua concentração em torno da raiz, os dois cátions competem pelos sítios comuns de absorção nas raízes (ANGHINONI & MEURER, 2004). Enquanto a absorção do Ca promove a divisão celular e consequente crescimento da raiz (TAIZ & ZEIGER, 2004), a absorção do Al pelas células radiculares desencadeia a redução da atividade mitótica, inibindo o crescimento da mesma (CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; RYAN et al, 1993; MAZZOCATO et al., 2002; FERREIRA et al, 2006). Portanto, o Ca pode estar competindo vantajosamente em relação aos sítios radiculares, sendo predominantemente absorvido em detrimento do Al, inibindo sua toxidez.

A capacidade da planta em otimizar a utilização de alguns nutrientes em presença de Al livre como o P

e o Ca é citada por Ferreira et al. (2006) como um mecanismo de resistir à toxidez por este elemento, onde a absorção e utilização do Ca na presença de altas concentrações de Al levam à inexistência de sinais de deficiência de desenvolvimento. Avaliando genótipos de trigo quanto à tolerância ao Al em condições de hidroponia adotando diferentes doses de Ca e tempo de exposição das plântulas ao Al, Camargo (1985) verificou que os sintomas de toxicidade ao Al eram acentuados com a redução da concentração de Ca e/ou da concentração salina da solução nutritiva, e pelo aumento no período de permanência em contato com o elemento tóxico. Este fato sugere a necessidade de adoção de concentrações maiores de Al ou maior tempo de exposição ao íon metálico quando se avalia a tolerância ao Al em genótipos de aveia branca utilizando soluções nutritivas mínimas.

A cultivar ALBASUL expressou comportamento similar na presença e na ausência do elemento tóxico nos três protocolos testados (Figura 1 e Tabela 2), evidenciando estabilidade de desempenho do tipo estática em relação às diferentes situações de ambiente, não variando o comprimento de raiz ao longo do aumento das concentrações do Al na solução nutritiva. Segundo Destro & Montalván (1999), este tipo de estabilidade na prática é pouco explorada, pois, quando presente, geralmente está relacionada a genótipos de pobre desempenho e que não reagem na presença de melhores ambientes, entretanto, tem importância quando ligada a caracteres de resistência às moléstias e pragas, e tolerância a fatores abióticos, como o Al tóxico presente no ambiente de cultivo. Avaliando conjuntamente resultados obtidos em outras avaliações (FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b; CRESTANI et al., 2009) pode-se sugerir que o menor desenvolvimento radicular da ALBASUL seja decorrente da expressão de genes que governam este caráter em particular, evidenciando uma menor capacidade genética para o crescimento de raiz, e não devido propriamente ao efeito tóxico causado pelo Al nestes órgãos. Ressalta-se que, na dose padrão, as cultivares classificadas como intermediárias e sensíveis tenderam a mostrar reduções do comprimento de raiz, principalmente no protocolo SM $AlCl_3$ (Tabela 2). A hipótese formulada é que, estas cultivares, como comentado para a Albasul, já tendem por si só, expressarem menor comprimento de raiz e, quando submetidas em condições de solução mínima, em que é fornecido apenas Ca à solução, parece evidente a menor capacidade de crescimento, em virtude da ausência dos demais nutrientes, diferentemente o que acontece para as soluções completas.

Como o efeito tóxico do Al está diretamente relacionado aos danos provocados no sistema radicular e à capacidade das raízes em absorver água e nutrientes, o comprimento total da raiz representa um

caráter diferencial para a sobrevivência do genótipo frente à presença do Al no ambiente de cultivo. Neste sentido, apesar de sofrer danos pela presença do Al nos três protocolos testados, a cultivar UFRGS 14 expressou elevado desempenho do comprimento de raiz, inclusive em condições adversas de cultivo, demonstrando sua grande capacidade de responder às melhorias das condições de ambiente e elevada capacidade genética para desenvolvimento de raiz. Desta maneira, esta cultivar pode ser recomendada para compor blocos de cruzamentos em programas de melhoramento genético de aveia branca que visem à obtenção de genótipos tolerantes ao Al, bem como, empregada no cultivo em regiões com solos ácidos com elevada disponibilidade deste elemento tóxico em solução.

Foi constatada a formação de três classes fenotípicas distintas quando os genótipos foram submetidos à toxidez por Al em solução completa,

utilizando a fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, onde as cultivares URS 20 e a UFRGS 14 constituíram as duas classes com desempenho superior, enquanto as cultivares UPFA 22, UF18 e ALBASUL formaram a classe com menores comprimento de raiz (Tabela 3). No protocolo caracterizado pelo uso de solução completa e Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, pode ser novamente verificada a formação de três classes, onde as cultivares URS 20 e UFRGS 14 apresentam novamente comprimento de raiz superior, a UPFA 22 com desempenho intermediário, e os genótipos UF18 e ALBASUL com médias inferiores. Já no protocolo com solução mínima e Al disponibilizado como $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ocorreu a formação de cinco classes fenotípicas, cada uma composta por um genótipo, onde a cultivar UFRGS 14 confirmou o maior comprimento total da raiz, seguido dos genótipos URS 20, UPFA 22, UPF 18 e ALBASUL.

Tabela 3. Análise de médias e herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) para o caráter comprimento total da raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por Al proporcionado por diferentes protocolos de avaliação em hidroponia. UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Nível de tolerância	Genótipo	Protocolo		
		SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	SC AlCl_3	SM AlCl_3
Tolerante	URS 20	7,06 a	4,21 a	4,87 b
	UFRGS 14	5,57 b	5,12 a	5,56 a
Intermediário	UPFA 22	4,13 c	3,80 b	3,09 c
Sensível	UPF 18	4,37 c	2,89 c	2,36 d
	ALBASUL	4,13 c	3,13 c	1,69 e
**Herdabilidade % (h_a^2)		SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	95,81	
		SC AlCl_3	92,79	
		SM AlCl_3	41,43	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ = Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; SC AlCl_3 = Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; SM AlCl_3 = Protocolo com solução mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; ** Herdabilidade no sentido amplo (h_a^2), em porcentagem (%), para o caráter comprimento total da raiz apresentada em cada protocolo de avaliação adotado.

O protocolo baseado no uso de solução completa com o Al fornecido como $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ proporcionou maior crescimento médio de raiz para todas as cultivares testadas (Tabela 3). Já no protocolo com mesma composição da solução padrão com Al fornecido como $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ foi verificada diminuição do desempenho médio das cultivares URS 20, UPF 18 e ALBASUL, sugerindo que esta segunda fonte de Al foi mais nociva ao desenvolvimento do sistema radicular em relação à primeira. Este comportamento pode estar associado à presença do íon SO_4^{2-} na solução quando o Al é disponibilizado na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, o qual pode provocar a precipitação de compostos sólidos de Al, como a jurbanita ($\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), basaluminita [$\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$] ou alunita [$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$], diminuindo a atividade do Al na solução (BISSANI et al., 2004). Enquanto isso, no protocolo caracterizado pela adoção de solução mínima e Al fornecido na fonte

$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, os genótipos apresentaram os menores comprimentos médios de raiz, com exceção da cultivar UFRGS 14, que evidenciou desempenho médio constante nas três metodologias adotadas, confirmado pelas curvas de regressão apresentadas na Figura 1.

O protocolo baseado na adoção de solução nutritiva completa e Al disponibilizado na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ mostrou o maior valor de h^2 (95,81%) entre as três condições de cultivo adotadas, seguido pelo protocolo SC $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (92,79%), e SM $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (41,43%) (Tabela 3). Estes resultados demonstram que os protocolos baseados em soluções completas, nas condições de cultivos adotadas, evidenciaram menor interferência do ambiente na expressão fenotípica das cultivares de aveia branca avaliadas, sugerindo serem os mais ajustados e com menores possibilidades de erro no momento da avaliação.

CONCLUSÕES

Os protocolos caracterizados pela adoção de Al na solução nutritiva completa nas fontes $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ e $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ são eficientes na identificação de genótipos de aveia branca tolerantes e sensíveis ao Al tóxico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 1.ed. Porto Alegre: Gênese, 2004, p.21-42.
- BAIER, A. C.; SOMMERS, D. J.; GUSTAFSON, J. P. Aluminium tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Plant Breeding**, Berlin, v.114, p.291-296, 1995.
- BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; COSTA DE OLIVEIRA, A. et al. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.55-63, 2006.
- BISSANI, C.A.; MEURER, E.J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2.ed. Porto Alegre: Gênese, 2004, p.181-205.
- CAMARGO, C.E.O. Efeitos de níveis de cálcio combinados com diferentes concentrações de sais na tolerância de trigo à toxicidade de alumínio, em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.44, n.2, p.659-668, 1985.
- CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.21-31, 1981.
- CARVALHO, F.I.F.; SILVA, S.A.; KUREK, A.J. et al. **Estimativas e implicações da herdabilidade como estratégia de seleção**. 1.ed. Pelotas: Editora Universitária da UFPel, 2001. 99p.
- CRESTANI, M.; CARVALHO, F.I.F.; COSTA DE OLIVEIRA, A. et al. Estresse por alumínio em genótipos de aveia preta em condição hidropônica. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.639-649, 2009.
- CRUZ, CD. **Programa Genes – versão Windows 2001.0.0**. Viçosa: Editora UFV, 2001. 648p.
- DESTRO, D.; MONTALVÁN, R. **Melhoramento genético de plantas**. 1.ed. Londrina: UEL, 1999. 820p.
- FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. 35p. (Documentos, 63).
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F. et al. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.07-15, 2007.
- FLEMING, A.L.; FOY, C.D. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.172-176, 1968.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C. Breeding oats at the University of Passo Fundo. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.29, p.35-37, 1979.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C.; EICHLER, L. Oat production and breeding in South Brasil. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.33, p.11-13, 1983.
- FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; ZIMMER, P.D. et al. Evaluation of aluminum tolerance in rice. **Journal of Crop Improvement**, London, v.16, n.1/2, p. 141-151, 2006.
- GARLAND, M.L.; CAMPBELL, K.A.; CARTER JUNIOR, T.E. Aluminum tolerance in soybean: genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. **Crop Science**, Madison, v.30, p.1049-1054, 1990.
- JO, J.; JANG, Y.; KIM, K. et al. Isolation of *ALU1-P* gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from arthrobacter viscosus. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Korea, v.239, n.3, p.835-839, 1997.
- LI, X.F.; MA, J.F.; MATSUMOTO, H. Pattern of aluminum-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v.123, n.4, p.1537-1544, 2000.
- MA, J.F.; NAGAO, K.; SATO, K. et al. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.55, n.401, p.1335-1341, 2004.
- MACHADO, P.L.O.A. **Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 22p. (Documentos, 2).
- MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V.; BARBOSA NETO, J.F. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.19-24, 2002.

FLOSS, E. **Fisiologia das Plantas Cultivadas: o estudo do que está por trás do que se vê.** 3.ed. Passo Fundo: Editora Universidade de Passo Fundo, 2006. 751 p.

RYAN, P.R.; JOSEP, M.D.; KOCHIAN, L.V. Aluminium toxicity in roots: investigation of spacial sensitivity and the role of root cap. **Journal of Experimental Botany**, London, v.44, n.259, p.437-446, 1993.

SÁNCHEZ-CHACÓN, C.D.; FEDERIZZI, L.C.; MILACH, S.C.K. et al. Variabilidade genética e herança da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1798-1808, 2000.

SAS LEARNING EDITION. **Program SAS - Getting started with the SAS Learning Edition.** North Carolina: Cary SAS Publishing, 2002. 200p.

SILVA, G.O.; CARVALHO, F.I.F.; COSTA DE OLIVEIRA, A. et al. Parâmetros de avaliação da tolerância ao alumínio tóxico em diferentes cultivares de aveia (*Avena sativa* L.). **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.12, n.4, p.401-404, 2006.

SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M. et al. Tolerância ao alumínio em cultivares de aveia branca sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.587-593, 2007a.

SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; REIS, C.S. et al. Reação de cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) ao estresse por alumínio em condições de hidroponia. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27., 2007, Passo Fundo, **Resultados experimentais...** Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, 2007b. v.1. p.57-60.

SOUZA, L.A.C. Reação de genótipos de soja ao alumínio em hidroponia e no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.36, n.10, p.1255-1260, 2001.

SPEHAR, C.R.; SOUZA, L.A.C. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.1, p.01-06, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.102-103.

VOSS, M.; SOUZA, C.N.A.; BAIER, A.C. et al. Método de avaliação de tolerância à toxidez de alumínio em trigo, em condições de hidroponia, na Embrapa Trigo. **Documentos Online...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, n.67, 16p., 2006. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do67.htm>. Acesso em: 28 mar. 2011.

ZHAO, Z.; MA, J.F.; SATO, K. et al. Differential Al resistance and citrate secretion in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Planta**, New York, v.217, n.5, p.794-800, 2003.