

# CARACTERIZAÇÃO DE CULTIVARES DE AVEIA QUANTO À TOLERÂNCIA À TOXICIDADE DO ALUMÍNIO, AVALIADAS EM HIDROPONIA

## CHARACTERIZATION OF OAT CULTIVARS REGARDING TOLERANCE TO ALUMINUM TOXICITY EVALUATED IN HYDROPONICS

Cecília Estima Sacramento dos Reis<sup>1</sup>; José Antonio Gonzales da Silva<sup>2\*</sup>; Fernando Irajá Félix de Carvalho<sup>3</sup>; Antonio Costa de Oliveira<sup>3</sup>; Jorge Luis Martins<sup>4</sup>; Taciane Finatto<sup>5</sup>; Maraísa Crestani<sup>5</sup>

### RESUMO

A tolerância de plantas ao alumínio ( $Al^{3+}$ ) pode ser determinada de forma eficiente através do emprego de cultivo hidropônico, utilizando como variável de observação, a retomada do crescimento de raiz. O presente trabalho teve por objetivo avaliar dezenove cultivares de aveia branca quanto à tolerância ao  $Al^{3+}$  em sistema de hidroponia. Foram detectadas diferenças quanto à tolerância ao  $Al^{3+}$  nas cultivares testadas. Pela análise conjunta de médias e a de regressão, ficou constatado que as cultivares mais tolerantes ao  $Al^{3+}$  foram FAPA 5, UPFA 22 e UPF 19.

Palavras-chave: *Avena sativa* L., melhoramento genético de plantas, estresse abiótico, retomada do crescimento de raiz.

### ABSTRACT

Aluminum tolerance ( $Al^{3+}$ ) can be efficiently determined through the use of hydroponic culture, using, as observation trait, root regrowth. The present work had as objective to evaluate nineteen white oat cultivars regarding  $Al^{3+}$  tolerance in hydroponic system. Differences were detected for  $Al^{3+}$  tolerance in the tested cultivars. Through the use of joint analysis and regression methods, it was observed that the most tolerant cultivars were FAPA 5, UPFA 22 and UPF 19.

Keywords: *Avena sativa* L., plant breeding, abiotic stress, root regrowth.

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o cultivo de aveia se expandiu de forma acentuada no sul do Brasil, principalmente com o advento da semeadura direta, rotação de culturas e aproveitamento da produção de grãos para comercialização e industrialização (SILVA *et al.*, 2007). Sua importância tem sido constatada devido ao aumento da área cultivada, principalmente pela demanda gerada pelas indústrias. Entretanto, para que a lavoura alcance um patamar de grande

importância econômica, há a necessidade de abranger novas áreas de cultivo, principalmente em regiões onde existem elevadas concentrações de  $Al^{3+}$  que limitam o desenvolvimento da planta de aveia.

Em regiões tropicais e subtropicais úmidas, onde a precipitação pluviométrica é muito intensa, facilmente ocorre a lixiviação dos nutrientes solúveis em água presentes no solo, como: magnésio, cálcio, potássio e outros elementos de reação alcalina. Desta forma, a remoção de nutrientes básicos acarreta em diminuição do pH, principalmente se o processo de intemperismo nas rochas para formação dos solos não repor a quantidade de cátions retirados pela lixiviação. Quando os microorganismos atuam sobre a matéria orgânica, esta é decomposta por mineralização, tendo como produtos nitritos e o hidrogênio ( $H^+$ ). Em decorrência disto, o pH se torna ainda mais reduzido, devido à liberação do cátion  $H^+$  que exerce função sobre os minerais, liberando o  $Al^{3+}$  que é retido por atração das cargas negativas da argila do solo em equilíbrio com o  $Al^{3+}$  em solução. Assim, o alumínio na solução contribui para um aumento na acidez do solo (BOHNEN, 1995; HARTWIG *et al.*, 2007), pois reage com a água formando hidróxido de alumínio e liberando íons  $H^+$ .

A acidez pode ser minimizada pela prática da calagem, pois a aplicação de calcário neutraliza o  $H^+$  e  $Al^{3+}$  em solução, propiciando um aumento no pH. Porém, a calagem atinge somente as camadas superficiais, não solucionando o problema de acidez no subsolo (ECHART & CAVALLI-MOLINA, 2001), mantendo o  $Al^{3+}$  solúvel e tóxico às plantas, causando restrição ao crescimento das raízes nas camadas mais profundas (FOY *et al.*, 1978, CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; SILVA *et al.*, 2007). Por outro lado, a alternativa mais promissora para reduzir os efeitos tóxicos do alumínio no solo é a exploração do potencial genético das plantas, pois as espécies e variedades diferem amplamente nos níveis de tolerância ao excesso desse elemento no solo.

A grande maioria dos solos brasileiros contém teores de alumínio que freqüentemente atingem níveis tóxicos às plantas. Sua toxicidade é geralmente um fator limitante para o aumento da produtividade das culturas em solos ácidos e seu efeito tóxico é caracterizado pela limitação no desenvolvimento do

<sup>1</sup> Estudante do curso de Pós-graduação em Agronomia (área de concentração Solos) em nível de Doutorado pela Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS.

<sup>2\*</sup> Dr., Professor do Departamento de Estudos Agrários do Curso de Agronomia da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ. Autor para correspondência: Rua do Comércio 3000 – Bairro Universitário, CEP: 98700-000 – Ijuí/RS, email: jagsfaem@yahoo.com.br.

<sup>3</sup> Dr., Professor do Departamento de Fitotecnia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (FAEM/UFPel), Pelotas/RS.

<sup>4</sup> Dr., Professor do Departamento de Química Analítica e Inorgânica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS.

<sup>5</sup> Estudante do curso de Pós-graduação em Agronomia (área de concentração Fitomelhoramento) em nível de Doutorado pela Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS.

(Recebido para publicação em 26/03/2008, aprovado em 21/09/2009)

sistema radicular e pela interferência causada na absorção, transporte e utilização de nutrientes (SILVA *et al.*, 1984). Os sintomas de amarelecimento e de redução de crescimento da parte aérea em trigo e em outros cereais de estação fria foram observados por Beckman em 1954, dando a denominação de crestamento, embora os trabalhos de melhoramento, visando a tolerância ao alumínio, estejam sendo descritos internacionalmente desde 1925.

A tolerância de plantas ao  $Al^{3+}$  pode ser determinada com eficácia através do emprego do cultivo hidropônico, utilizando soluções nutritivas em laboratório. Neste sentido, a mensuração do caráter retomada de crescimento da raiz, após o tratamento com as concentrações de alumínio nas soluções, torna possível selecionar fenotipicamente os genótipos como tolerantes ou sensíveis (CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; RIEDE & ANDERSON, 1996, SILVA *et al.*, 2004). Portanto, a técnica de cultivo hidropônico para avaliação da sensibilidade ao  $Al^{3+}$  em solução nutritiva representa ser a mais adequada, pois, a avaliação a campo, embora seja a mais utilizada pelos melhoristas, pode apresentar o inconveniente de reunir grande número de variáveis não controláveis, mascarando os resultados obtidos (FURLANI & CLARK, 1981; SILVA *et al.*, 2007).

O presente trabalho teve por objetivo avaliar dezenove cultivares de aveia branca (*Avena sativa* L.), quanto à tolerância ao  $Al^{3+}$  avaliadas sob sistema de hidroponia, a fim de que os genótipos possam ser estrategicamente recomendados ou indicados em blocos de cruzamentos para a obtenção de constituições genéticas com elevado potencial produtivo e de tolerância ao  $Al^{3+}$  para cultivo em solos ácidos.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Duplo-haplóides e Hidroponia do Centro de Genômica e Fitomelhoramento da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel/UFPel. Foi realizada a avaliação de dezenove cultivares de aveia branca, que foram: ALBASUL, CFT1, FAPA4, FAPA5, FAPA6, UFRGS14, UFRGS15, UFRGS17, UFRGS19, UFRGS21, UFRGS22 e UFRGS23, empregando as seguintes concentrações de  $Al^{3+}$ : 0, 7 e 21mg.L<sup>-1</sup>. O delineamento experimental utilizado foi o completamente casualizado com três repetições e 12 plântulas de cada cultivar por repetição.

Primeiramente, foi efetuado o descasque e desinfestação das sementes com hipoclorito de sódio (20% do produto comercial e 80% de água destilada) por um minuto e três lavagens com água destilada para remoção do produto desinfestante. Após, as sementes foram colocadas em gerbox, sobre faixas de papel filtro umedecido e levadas à BOD (câmara de germinação) com temperatura de 20°C e iluminação permanente por 48 horas para germinação. A seguir, as sementes já germinadas foram transferidas para telas plásticas adaptadas às tampas de recipientes plásticos (baldes) com capacidade de 5,5L, contendo a solução nutritiva normal (sem  $Al^{3+}$ ) segundo protocolo desenvolvido por Camargo & Oliveira (1981) e pH regulado para 4,0 ± 0,3. Portanto, a solução foi obtida pela diluição em 5,5L de água destilada com: 65mL de  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  78,4g L<sup>-1</sup>, 65mL de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  40,92 g L<sup>-1</sup>, 65mL de  $KNO_3$  33,57g L<sup>-1</sup>, 65mL de  $(NH_4)_2SO_4$  4,77g L<sup>-1</sup>, 65mL  $KH_2PO_4$  65g L<sup>-1</sup>, 6,5mL de Fe-EDTA 43,25g L<sup>-1</sup> e 65mL da solução de micronutrientes que é formada pela adição de: 10mL de  $H_3BO_3$  0,05146g L<sup>-1</sup>, 1mL de  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$  0,00201g L<sup>-1</sup>, 10mL de NaCl 0,14567g L<sup>-1</sup>, 1mL

de  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  0,01906g L<sup>-1</sup>, 1mL de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  0,00623g L<sup>-1</sup> e 1mL de  $MnSO_4 \cdot H_2O$  0,03702g L<sup>-1</sup> a 2L de água destilada.

Os baldes contendo solução nutritiva e as cultivares para avaliação foram colocados em tanque de hidroponia à temperatura de 25°C, iluminação artificial permanente e sistema de aeração adicionado individualmente às soluções para dotação adequada de oxigênio às raízes. As plântulas foram mantidas por 48h em solução sem alumínio. Após, as telas com as plântulas foram transferidas para novos baldes de 5,5L com solução nutritiva normal (10%) e doses de 0, 7 e 21mg.L<sup>-1</sup> de alumínio, permanecendo por mais 48 h, em pH ajustado para 4,0 ± 0,3, de modo a evitar a precipitação de compostos insolúveis, principalmente hidróxido de alumínio. É importante ressaltar que na cultura da aveia branca, os níveis indicados de alumínio para a discriminação de genótipos sensíveis e tolerantes se encontram no intervalo de 7 a 21mg L<sup>-1</sup>, sendo a concentração de 20 mgL<sup>-1</sup> considerada altamente eficiente (SÁNCHEZ-CHACÓN *et al.*, 2000; NAVA *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2007; FINATTO *et al.*, 2007).

Na última etapa de execução do experimento, as telas retornaram à solução nutritiva normal permanecendo por mais 72h a fim de permitir a retomada do crescimento de raízes (RCR), principalmente dos genótipos tolerantes. Para avaliação do efeito do alumínio nos genótipos testados, foi mensurada a retomada do crescimento de raiz com o auxílio de uma régua, a partir do ponto de dano causado pelo  $Al^{3+}$  na raiz principal, caracterizado por um escurecimento e engrossamento da raiz.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de comparação de médias por Tukey visando classificar os genótipos em cada concentração de alumínio. Foram estimados e avaliados também, os modelos de regressão para o ajuste e a interpretação dos dados, conforme modelo proposto por Steel & Torrie (1990).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados pela análise de variância (Tabela 1) permitiram verificar que os genótipos avaliados, as doses de alumínio aplicadas, bem como a interação genótipo x dose, diferiram estatisticamente entre si pelo teste F para a variável dependente retomada do crescimento de raiz (RCR), o que indica a presença de variabilidade genética entre os cultivares estudados. Por ter sido confirmada a interação genótipo x dose, a análise prosseguiu de modo a fixar o fator dose e permitir o estudo das diferentes cultivares para cada um dos níveis de  $Al^{3+}$  aplicado no experimento. Através desta análise, foi verificado que, pelo menos uma dentre as demais cultivares, diferiu estatisticamente entre si em cada concentração do elemento químico (Tabela 1).

Através da análise de médias para a variável RCR (Tabela 2), na dose 0mg L<sup>-1</sup> de  $Al^{3+}$  na solução, as dezenove cultivares foram ranqueadas em duas classes distintas ("a" e "b"), evidenciando que nesta fase de plântula, já ocorrem diferenças quanto ao comprimento total da raiz principal, o que de certa forma é relevante, pois segundo Reis *et al.* (2008) genótipos com maior comprimento e agressividade de raiz, apresentam maior capacidade de suportar o estresse de alumínio em solos com elevada acidez. Desse modo, as cultivares UPF 15, UPF 16, UPFA 22 e URS 20 apresentaram os maiores valores de crescimento de raiz "a", se destacando dos demais.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância conjunta para a variável retomada do crescimento de raiz (RCR) de dezenove cultivares de aveia em diferentes doses de alumínio na solução e de forma individual fixando o fator dose. FAEM/UFPEL, 2008

Fonte de Variação	GL	QM <sub>RCR</sub> (cm)	Média Geral	CV(%)
Modelo	56	6,59	1,80	27,17
Genótipo	18	1,45*	-	-
Dose	2	164,49*	-	-
Genótipo x Dose	36	0,39*	-	-
Erro	114	0,24*	-	-
Total	170	-	-	-
Fixando o Fator Dose		QM <sub>RCR 0mg L<sup>-1</sup></sub>	QM <sub>RCR 7mg L<sup>-1</sup></sub>	QM <sub>RCR 21mg L<sup>-1</sup></sub>
Genótipo/Dose	18	1,33*	0,72*	0,16*
Erro	38	0,59	0,08	0,04
Total	56	-	-	-
Média	-	3,71	1,21	0,46
CV (%)	-	20,70	23,57	24,39

Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F; QM<sub>RCR</sub> = Quadrado médio da retomada do crescimento de raiz.

Considerando as doses 7 e 21mg L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> na solução, é possível perceber que o efeito tóxico do íon metálico tende a se agravar à medida que sua concentração é aumentada nas cultivares FAPA 5, UFRGS 19, UPF 18, UPFA22, URS 20 e URS 21, no entanto, as demais cultivares evidenciaram o mesmo comportamento nessas concentrações. Na dose 7mg L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup>, os genótipos que obtiveram os melhores desempenhos "a" foram: FAPA 5, UPF 15, UPFA 22 e URS 20, seguidas pela FAPA 4, UFRGS 19, UPF 16, UPF 19 e UPFA 20 que evidenciaram um grupo moderadamente tolerante "b". Já os cultivares FAPA 6, UFRGS 14, UFRGS 17, UPF 18, URS 21 e URS 23 formaram o grupo "c" moderadamente sensível e nesta mesma concentração, as cultivares ALBASUL, CFT 1, UFRGS 15 e URS 22 formaram o grupo "d", evidenciando elevada sensibilidade. Fato relevante foi que também Finatto *et al.* (2007), estudando a sensibilidade de cultivares de aveia quanto a tolerância ao alumínio, constataram que a cultivar ALBASUL apresentou média de RCR fortemente reduzida em 10 mg de Al<sup>3+</sup> em solução nutritiva, indicando

portanto, o emprego desta cultivar como genótipo padrão de sensibilidade nesta espécie nos estudos com alumínio em solução hidropônica.

A dose 21mg L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> permitiu discriminar três grupos distintos, sendo que as cultivares FAPA 5, UPF 19 e UPFA 22 representaram o grupo "a", por evidenciarem maior RCR. Além disso, as cultivares UPF 15, UPF 16, UPFA 20, URS 20, URS 21 e URS 23 formaram um grupo intermediário "b" e as demais indicaram grande sensibilidade na dose mais elevada de alumínio. Em genótipos sensíveis ao Al<sup>3+</sup>, além de serem fortemente afetados no crescimento das raízes, o íon metálico prejudica fortemente a absorção, transporte e utilização de elementos como o Mg (KOCHIAN, 1995) e Ca (SALVADOR *et al.*, 2000), podendo comprometer ainda, na aquisição e transporte de água pelas plantas. Além disto, segundo Malavolta *et al.* (1997), o alumínio na forma solúvel, compete com outros cátions pelos mesmos sítios de ligação no complexo de troca das raízes, agravando de forma mais efetiva os efeitos de sua toxidez na planta.

Tabela 2 - Valor médio da retomada de crescimento da raiz (RCR), em centímetros, para as dezenove cultivares avaliadas em concentrações de 0, 7 e 21mg.L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> na solução. FAEM/UFPEL/2008.

GENÓTIPO	GENEALOGIA	DOSE DE Al <sup>3+</sup> NA SOLUÇÃO		
		0mg L <sup>-1</sup>	7mg L <sup>-1</sup>	21mg L <sup>-1</sup>
ALBASUL	UFRGS 14 / UFRGS 881920	2,45 b	A 0,25 d	A 0,23c
CFT 1	UPF 16 / UFRGS 16	3,44 b	A 0,63 d	A 0,22 c
FAPA 4	UFRGS881920 / UFRGS 7	2,82 b	A 1,46 b	A 0,35 c
FAPA 5	UPF 850380 reselection / Guaíba selection 1 / CTC84B993	3,44 b	A 1,94 a	B 0,82 a
FAPA 6	UPF 14 // Guaíba selection 1 / CTC84B993	3,72 b	A 1,00 c	A 0,33 c
UFRGS 14	805165 // Cor2*/Ctz3*/Pendek/ME1563	3,28 b	A 1,09 c	A 0,31 c
UFRGS 15	Cor2*/Ctz3*/Pendek/ME1563 /C16 CRcpx/C7512/SRcpx74C8014	3,33 b	A 0,63 d	A 0,28 c
UFRGS 17	Cor2*/Ctz3*/Pendek/ME1563 // 76-29/76-23/75-28/CI833	3,71 b	A 1,13 c	A 0,21 c
UFRGS 19	UFRGS 884110 / UFRGS 884021-1	3,36 b	A 1,39 b	B 0,45 c
UPF 15	QR 306 = Coker 82-33 // IL 3376 / OA338	4,42 a	A 1,72 a	A 0,51 b
UPF 16	Coronado / X1799-2 / Sel 11 Passo Fundo // X3530-40	4,20 a	A 1,51 b	A 0,53 b
UPF 18	UPF 85S0238 / UPF 12	3,57 b	A 1,14 c	B 0,23 c
UPF 19	90SA-30 (UPF 16) / 90AS-28 (Cor2*/Ctz3*/Pendek/ME1563)	3,88 b	A 1,44 b	A 0,84 a
UPFA 20	QR 981 = UPF 80197 (X 2082-2/ CI 8428/Steele)	3,85 b	A 1,34 b	A 0,54 b
UPFA 22	90SAP-37 (UFRGS 10)/90SAP-28 (Cor2*/Ctz3*/Pendek/ME1563)	5,07 a	A 1,87 a	B 0,79 a
URS 20	UFRGS 86 <sup>A</sup> 1194-2 / UFRGS 8	4,81 a	A 2,04 a	B 0,60 b
URS 21	UFRGS 10 / CTC 84B993	3,74 b	A 0,83 c	B 0,53 b
URS 22	UFRGS 884110 / UFRGS 884021-1	3,34 b	A 0,66 d	A 0,27 c
URS 23	UPF 850380 res. // Guaíba sel / CTC 84B993	3,73 b	A 0,94 c	A 0,59 b

Médias não abrangidas pela mesma letra minúscula, na coluna ou pela mesma letra maiúscula, na linha, diferiram estatisticamente a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Scott Knott. Os sinais / e // indicam a ordem em que os cruzamentos foram realizados; os retrocruzamentos estão simbolizados com um asterisco (\*) e o número indica o número de retrocruzamentos com o genitor recorrente.

No estudo, pode ser constatado que, na dose  $7\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , ocorreu a formação de classes intermediárias tendendo para tolerância ou sensibilidade, por outro lado, a dose  $21\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  foi fortemente restritiva, permitindo de forma clara, a separação das cultivares em tolerantes, intermediárias e sensíveis. Estudando a tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  em trigo com o emprego de cultivo hidropônico, Bertan *et al.* (2005) classificaram as cultivares de trigo em tolerantes, intermediárias e sensíveis, adicionando  $10\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  na solução. Já para Sanchez-Chacón *et al.* (2000), estudando 21 genótipos de aveia branca do programa de melhoramento genético da Universidade Federal do Rio grande do Sul quanto à reação do  $\text{Al}^{3+}$ , a variabilidade fenotípica foi observada a partir de  $10\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  na solução e a dose de  $20\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  foi a que melhor discriminou os genótipos testados.

Observação relevante foi em relação às cultivares que, além de demonstrarem maior comprimento de raiz principal na dose  $0\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , também apresentaram os melhores desempenhos para RCR na dose  $7\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  (UPF 15, UPF 16, UPFA 22 e URS 20), com exceção da FAPA 5 que, na dose  $7\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , evidenciou elevada tolerância ("a") e, na dose sem  $\text{Al}^{3+}$ , ficou incluída no grupo "b". Estes resultados permitem levantar a hipótese que o comprimento de raiz principal pode ser considerado como uma variável auxiliar de seleção para tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  associada ao caráter RCR. Em trigo, foi observada uma associação elevada e positiva entre o comprimento de raiz e a retomada do crescimento de raiz (BERTAN *et al.* 2005). No arroz, esta associação também foi confirmada, porém, sendo o comprimento de raiz o caráter principal de seleção (FREITAS *et al.* 2006). Outra hipótese que pode ser formulada é a permanência das plântulas num período maior de tempo em solução nutritiva sem alumínio, o que pode permitir distinguir de maneira mais eficiente a diferença genética existente quanto ao comprimento da raiz principal. Estas observações devem ser consideradas, visto que, segundo Reis *et al.* (2008), forte correlação foi observada em aveia branca entre o comprimento de raiz com a retomada do crescimento de raiz nas doses de  $7$  e  $21\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  na solução, com associações de magnitude da ordem de  $r=0,72$  e  $r=0,94$ , respectivamente.

Na análise da Tabela 2 (comparação na linha), para as doses  $7$  e  $21\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , foi possível detectar que grande parte das cultivares testadas demonstraram a mesma classe, indicando que a menor dose do elemento químico ( $7\text{mg L}^{-1}$ ) é suficiente para permitir uma avaliação eficaz do nível de tolerância. Além disso, a interação genótipo x dose foi expressa pelo comportamento diferenciado das médias produzidas pelas distintas constituições genéticas, sendo que, para as cultivares FAPA 5, UFRGS 19, UPF 18, UPFA 22, URS 20 e URS 21, a tolerância foi intermediária na dose de  $7\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  (comportamento linear) e nas demais cultivares avaliadas a expressão foi constante a partir desta concentração.

A análise de médias permite inferências consistentes para os genótipos apenas quando comparados dentro de cada dose. Além disso, pelo fato da dose apresentar níveis de um fator quantitativo, se torna necessário uma análise mais apropriada através dos modelos de regressão para explicar o comportamento das constituições genéticas testadas com a variação do nível de  $\text{Al}^{3+}$  na solução. Pelo

teste de significância para as equações dos tipos linear e quadrático, foi verificado que todos os genótipos estudados evidenciaram equação do tipo quadrática ( $y = a + b_1x + b_2x^2$ ) e parâmetro ( $b_2$ ) significativo através do teste t (Tabela 3). Entretanto, a cultivar FAPA 4 evidenciou modelo do tipo linear ( $y = a + b_1x$ ), porém com parâmetro ( $b_1$ ) não significativo.

Empregando o modelo matemático  $-b_1/2b_2$  foi possível inferir sobre a concentração máxima de  $\text{Al}^{3+}$ , a partir da qual tende a paralisar a retomada do crescimento de raiz, permitindo assim mais fácil e consistente interpretação biológica dos genótipos em estudo. Portanto, através da análise de regressão (Tabela 3), as cultivares identificadas como os mais tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$  foram: FAPA 5 (Figura 1D), UFRGS 19 (Figura 1I), URS 20 (Figura 2F) e UPF 15 (Figura 1J), apresentando valores de tolerância de 18,79; 17,65; 17,54 e  $17,36\text{ mg.L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , respectivamente. Já as cultivares ALBASUL (Figura 1A), URS 21 (Figura 2G), URS 23 (Figura 2I) e CFT 1 (Figura 1B), foram sensíveis ao alumínio, apresentando valores de retomada do crescimento de raiz paralisada em 13,50; 14,42; 14,50 e  $14,58\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , respectivamente.

É importante registrar que, de modo geral, os genitores que deram origem às cultivares que expressaram tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  são oriundos de solos onde há elevada concentração deste íon metálico, já os que originaram as cultivares sensíveis, foram selecionadas em regiões com baixos níveis do elemento químico disponível (Tabela 2). Bertan *et al.* (2005), estudando trigos originados da região sul do Brasil, determinaram que os genótipos classificados como mais tolerantes eram provenientes de programas de melhoramento de áreas de elevada acidez, confirmando a hipótese de Andrade (1976), de que a tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  pode estar intimamente ligada à origem de cada constituição genética, pois um genótipo desenvolvido sem pressão de seleção, dificilmente terá em sua constituição genes efetivos para o caráter.

Segundo Hartwig *et al.* (2007), nos últimos anos vem aumentando consideravelmente a consciência de que a solução dos problemas dos solos ácidos não somente está relacionada com a tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$ , mas também quanto a eficiência na absorção de fósforo e outros nutrientes, bem como da tolerância a outros metais tóxicos em condição ácida. Além disso, o mesmo autor comenta que as pesquisas têm identificado constantemente genes que revelam relação com a tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$ , abrindo novas fronteiras para as bases genéticas e moleculares da tolerância a esse elemento químico. Portanto, promover o emprego de novas técnicas na identificação de genótipos tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$  como o uso de recursos moleculares via seleção assistida por marcadores pode maximizar de sobremaneira o incremento de ganho genético na busca de genótipos superiores mais ajustados aos diferentes ambientes agrícolas.

Contudo, a recomendação de cultivares de elevado potencial genético, que são indicadas com base no incremento do rendimento de grãos e adaptação e estabilidade às diferentes regiões edafoclimáticas, podem ser associadas ao conhecimento do nível de tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$ , empregando as melhores constituições genéticas de acordo com a toxidez do  $\text{Al}^{3+}$  característico de cada região.

Tabela 3 - Resumo da análise de regressão para a variável dependente RCR para as dezenove cultivares avaliadas sob 0, 7, 21mg.L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> na solução. FAEM/UFPel/2008.

Genótipo	Fonte de Variação	QM <sub>RCR</sub>	R <sup>2</sup>	Estimativa (b)	(-b <sub>1</sub> /2b <sub>2</sub> ) (mg.L <sup>-1</sup> )
ALBASUL	Linear	5,65*	0,94	-	-
	Quadrático	4,08*	-	0,015*	13,5
CFT 1	Linear	12,65*	0,91	-	-
	Quadrático	5,81*	-	0,018*	14,58
FAPA 4	Linear	6,31*	0,79	-0,172 <sup>ns</sup>	-
	Quadrático	0,22 <sup>ns</sup>	-	-	-
FAPA 5	Linear	8,41*	0,94	-	-
	Quadrático	0,88*	-	0,007*	18,79
FAPA 6	Linear	17,32*	0,86	-	-
	Quadrático	6,29*	-	0,018*	15,67
UFRGS 14	Linear	11,45*	0,88	-	-
	Quadrático	2,78*	-	0,012*	16,63
UFRGS 15	Linear	11,28*	0,93	-	-
	Quadrático	5,46*	-	0,017*	14,88
UFRGS 17	Linear	15,90*	0,90	-	-
	Quadrático	3,85*	-	0,014*	16,79
UFRGS 19	Linear	11,30*	0,94	-	-
	Quadrático	1,93*	-	0,010*	17,65
UPF 15	Linear	20,24*	0,92	-	-
	Quadrático	3,77*	-	0,014*	17,36
UPF 16	Linear	17,52*	0,94	-	-
	Quadrático	4,13*	-	0,015*	16,27
UPF 18	Linear	14,48*	0,99	-	-
	Quadrático	3,35*	-	0,013*	16,96
UPF 19	Linear	11,59*	0,90	-	-
	Quadrático	3,95*	-	0,015*	15,03
UPFA 20	Linear	16,14*	0,86	-	-
	Quadrático	5,30*	-	0,017*	15,47
UPFA 22	Linear	21,97*	0,99	-	-
	Quadrático	6,35*	-	0,019*	15,42
URS 20	Linear	25,32*	0,96	-	-
	Quadrático	3,43*	-	0,014*	17,54
URS 21	Linear	12,36*	0,99	-	-
	Quadrático	6,55*	-	0,019*	14,42
URS 22	Linear	11,34*	0,98	-	-
	Quadrático	5,34*	-	0,017*	14,76
URS 23	Linear	12,43*	0,93	-	-
	Quadrático	5,76*	-	0,018*	14,50

Significativo a 5 % de probabilidade de erro pelo teste F (QM<sub>RCR</sub>) e pelo teste t (Estimativa b<sub>i</sub>); QM<sub>RCR</sub> = Quadrado médio da retomada do crescimento de raiz em milímetros.

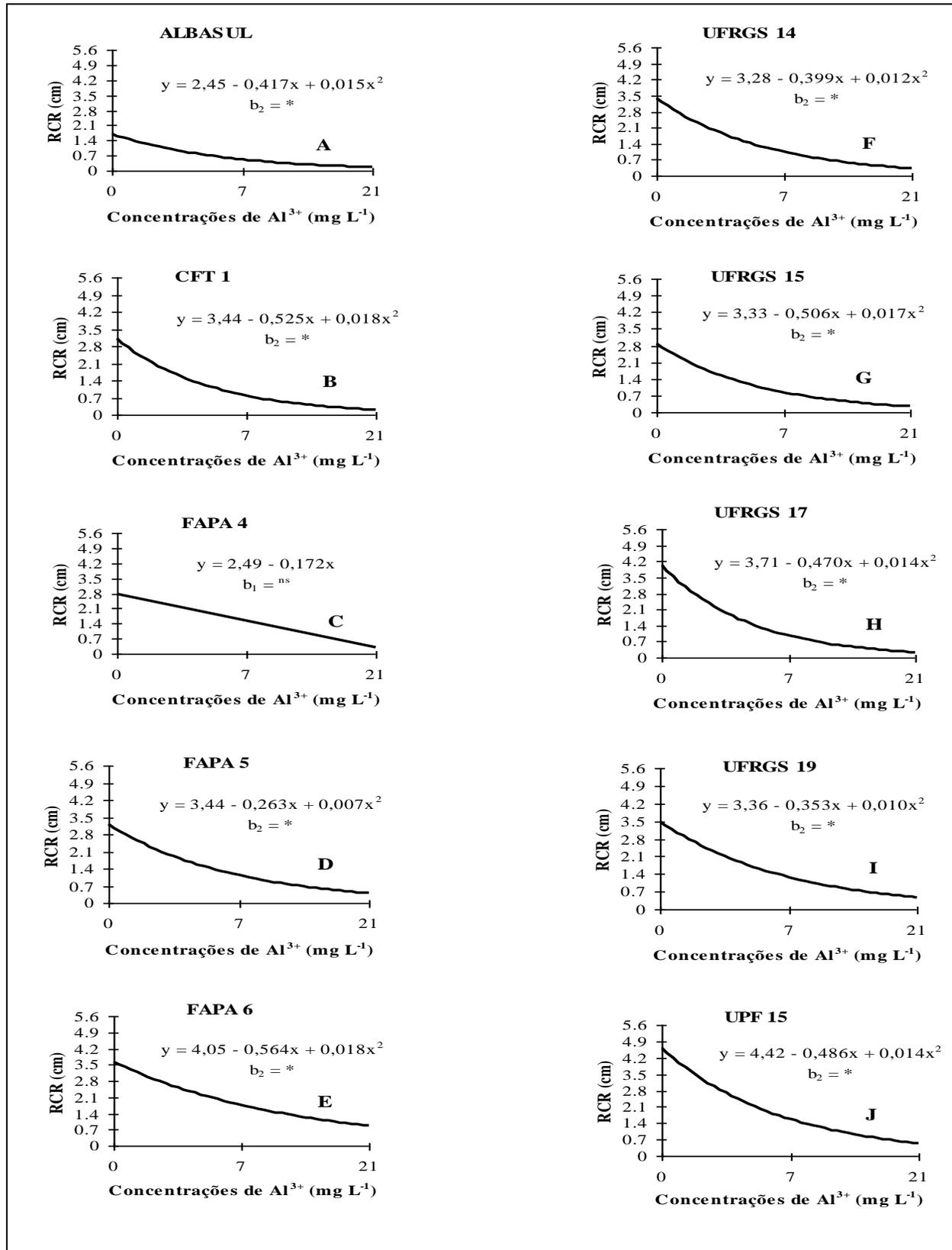


Figura 1 - Regressões ajustadas para a variável dependente retomada do crescimento de raiz (RCR) para as cultivares ALBASUL, CFT 1, FAPA 4, FAPA 5, FAPA 6, UFRGS 14, UFRGS 15, UFRGS 17, UFRGS 19 e UPF 15 nas concentrações de 0, 7 e 21  $mg L^{-1}$  de  $Al^{3+}$  na solução. FAEM/UFPeL, 2008.

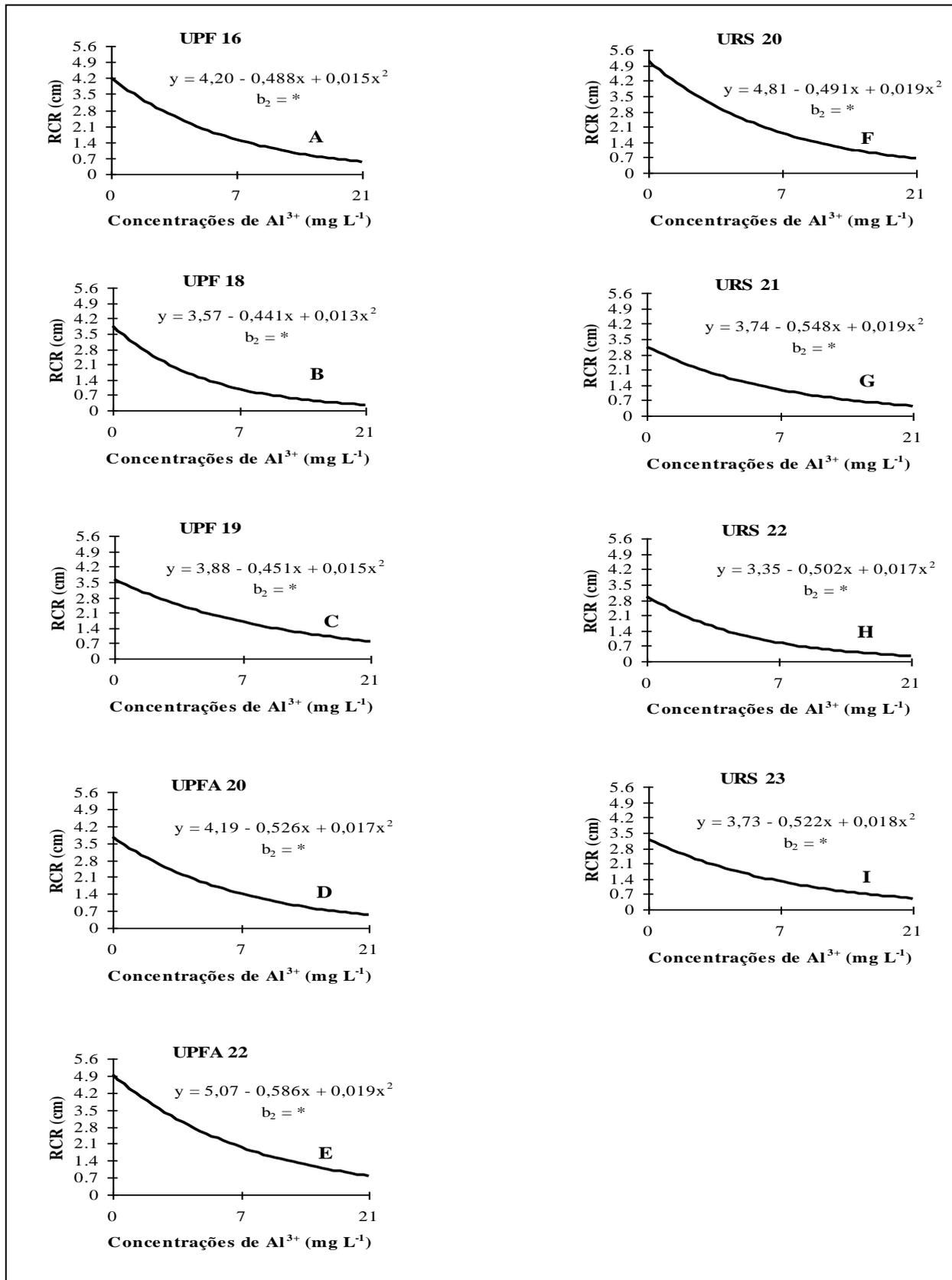


Figura 2 - Regressões ajustadas para a variável dependente retomada do crescimento de raiz (RCR) para as cultivares UPF 16, UPF 18, UPF 19, UPFA 20, UPFA 22, URS 20, URS 21, URS 22 e URS 23 nas concentrações de 0, 7 e 21mg L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> na solução. FAEM/UFPel, 2008.

## CONCLUSÃO

São evidenciadas diferenças genéticas quanto à tolerância ao  $Al^{3+}$  nas cultivares recomendadas de aveia avaliadas em cultivo hidropônico. As cultivares de aveia mais tolerantes ao  $Al^{3+}$  são FAPA 5, UPFA 22 e UPF 19. As constituições FAPA 5, UFRGS 19, UPF 18, UPFA 22, URS 20 e URS 21 revelam decréscimo de retomada do crescimento de raiz de forma linear com o incremento do alumínio na solução.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J.M.V. **Identificação e seleção em casa de vegetação, de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) tolerantes ao alumínio e ao manganês com modificações das características químicas do solo.** Porto Alegre, 1976. 100p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; et al. Caracteres associados à tolerância ao alumínio tóxico em genótipos de trigo sul brasileiros. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.11, n.2, p.149-154, 2005.
- BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A. & TEDESCO, M.J. **Princípios de fertilidade de solo.** Departamento de Solos. Faculdade de Agronomia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.51-76, 1975.
- 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, p.21–23, 1981.
- ECHART, C.L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.3, p.531-541, 2001.
- 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.
- FOY CD, CHANEY R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Bethesda, v.29, n.1, p.511-566, 1978.
- FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; SOUSA, R.O.; et al. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.72-79, 2006.
- FURLANI, P.R.; CLARK, R.B. (1981) Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solution. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, n.1, p.587-594, 1981.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.2, p.219-228, 2007.
- JONES, U.S. **Fertilizers & Soil Fertility.** Reston: Reston. 1979. 368p.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.46, n.1, p.237-260, 1995.
- MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997, 319p.
- NAVA, I.C.; DELATORE, C.A.; DUARTE, I.T.L.; et al. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.) **Euphytica**, Wageningen, v.148, n.3, p.353-358, 2006.
- REIS, C.E.S.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; et al. Eficiência de seleção para tolerância ao alumínio pelo emprego de caracteres correlacionados em aveia. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.14, n.1, p.46-51, 2008.
- RIEDE, C.R.; ANDERSON, J.A. Linkage of RFLP markers to aluminum tolerance gene in wheat. **Crop Science**, Madison, v.36, n.1, p.905-909, 1996.
- SALVADOR, J.O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; et al. Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, n.4, p.787-796, 2000.
- 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.1797-1808, 2000.
- SILVA, J.B.C.; NOVAIS, R.F.; SEDIYAMA, C.S. Comportamento de genótipos de soja em solo com alta saturação de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.2, p.287-298, 1984.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; et al. Trigos di-haplóides com potencial para tolerância à toxicidade ao alumínio e a sensibilidade ao ácido giberélico em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.10, n.2, p. 37-41, 2004.
- 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, 2007.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach.** New York: MacGraw-Hill Book Company, 1980. 663 p.