

EFICIÊNCIA DE SELEÇÃO PARA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO PELO EMPREGO DE CARACTERES CORRELACIONADOS EM AVEIA

EFFICIENCY OF SELECTION FOR TOLERANCE TO ALUMINUM BY THE USE OF CORRELATED CHARACTERS IN OAT

Cecilia Estima Sacramento dos Reis; José Antônio Gonzalez da Silva; Fernando Irajá Félix de Carvalho; Jorge Luiz Martins; Antônio Costa de Oliveira; Irineu Hartwig; Ivandro Bertan; Luciano Carlos da Maia; Taciane Finatto; Gustavo da Silveira; Laerte Reis Terres.

RESUMO

O comportamento das plantas sob estresse por alumínio (Al^{3+}) pode ser determinado por meio de vários parâmetros em avaliações a campo, casa de vegetação ou em laboratório, utilizando cultivo hidropônico. O objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes caracteres existentes tanto na parte aérea como no sistema radicular de aveia que possam estar fortemente correlacionados com o caráter retomada do crescimento de raiz, que é indicador de tolerância ao alumínio, avaliados em hidroponia. A análise de correlação permitiu evidenciar que os caracteres: estatura de plântula, comprimento de raiz, comprimento da primeira folha, comprimento da segunda folha e matéria seca da raiz podem ser empregados na seleção indireta, visando ganho genético para tolerância ao Al^{3+} tóxico em aveia.

INTRODUÇÃO

A aveia branca (*Avena sativa* L.) é um cereal que apresenta múltiplos propósitos. Na alimentação humana, tem sido alvo de intensas pesquisas, principalmente por evidenciar um teor de proteína no grão (16 a 24%) mais elevado em relação aos demais cereais, vitaminas essenciais, minerais, ácidos graxos e fibras solúveis (fundamentais para redução dos níveis de colesterol no sangue). Na alimentação animal, serve como forragem verde de elevada qualidade nutricional, feno, silagem e na composição de ração, garantindo, no período de estação fria, estabilidade de produção leiteira e de carne na entressafra. No sul do Brasil e em partes do sudeste e centro-oeste, a aveia é cultivada como espécie produtora de grãos e de palha para a cobertura do solo, favorecendo principalmente a implantação das culturas de estação quente sob sistema de semeadura direta (CECCON et al., 2004).

Solos ácidos existem em todas as partes do mundo onde há clima tropical e subtropical, e estão diretamente associados aos elevados níveis de alumínio e manganês no solo. A toxidez do alumínio é influenciada por diversos fatores como pH, minerais argilosos predominantes, nível de matéria orgânica, concentração de cátions, ânions e sais totais (FAGERIA, 1984). Porém, a toxidez deste elemento químico não ocorre em solos com pH acima de 5,5 (JONES, 1979; BOHNEN, 1995), mas em geral é particularmente severa em valores inferiores a 5,0, devido à solubilidade do alumínio aumentar acentuadamente, ocupando mais de 50% da capacidade de troca de cátions do solo (MAGISTAD, 1925 e BENNET & BREEN, 1991).

O alumínio reduz o teor de açúcar das folhas de várias espécies, além de reduzir a absorção de fósforo (ABICHEQUER et al., 2003), cálcio (ECHART & CAVALLI-MOLINA, 2001), potássio e magnésio (BASSO et al., 2003), entre outros minerais.

Palavras-chave: Avena sativa L., melhoramento vegetal, retomada do crescimento de raiz, correlação.

ABSTRACT

The behavior of plants under aluminum (Al^{3+}) stress can be determined through many parameters in field, greenhouse or laboratory (hydroponic culture). The objective of the present work was to study different characters existing both in the shoot and root systems of oat that can be strongly correlated with the character root regrowth evaluated in hydroponic culture. The correlation analysis suggests that the characters: plant height, root length, first leaf length, second leaf length and root dry matter can be employed in the indirect selection, aiming the genetic gain for Al^{3+} tolerance in oat.

Keywords: Avena sativa L., plant breeding, root regrowth, correlation

O efeito de elevadas concentrações deste íon metálico na célula determina o aumento da viscosidade do protoplasma e diminui a permeabilidade dos nutrientes e água, causando deficiência mineral e estresse hídrico. Além disto, prejudica a divisão e a elongação celular, comprometendo no adequado desenvolvimento de raízes (HOFLE, 1958; ZHAO et al., 1987; BARCELÓ et al., 1996; DEGENHARDT et al., 1998; ECHART & CAVALLI-MOLINA, 2001).

Em trigo, foi observado que os cultivares tolerantes apresentavam grande habilidade no alongamento das raízes e elevada resistência ao dano morfológico em comparação aos cultivares sensíveis (FLEMING & FOY, 1968; CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; BERTAN et al., 2005). Em arroz, FAGERIA (1982) mostrou que os cultivares tolerantes apresentaram raízes mais desenvolvidas do que os genótipos sensíveis e, em cevada, REID et al. (1971) demonstraram que a toxidez do íon metálico (Al^{3+}) reduz consideravelmente o peso de raiz, além de promover seu escurecimento, principalmente nas extremidades.

A reação das plantas ao Al^{3+} pode ser determinada e mensurada por meio de vários parâmetros em avaliações a campo, casa de vegetação ou em laboratório (SILVA et al., 2004) e diferenças entre genótipos quanto à reação a esse elemento químico podem ser estabelecidas pela mensuração do peso seco da parte aérea e raízes, translocação de fósforo das raízes à parte aérea, comprimento de raízes, comprimento relativo de raiz e retomada do crescimento de raiz (SÁNCHEZ-CHACÓN et al., 2000).

Um método eficiente e confiável é o emprego do cultivo hidropônico em laboratório, justamente pela facilidade de avaliação e homogeneidade das condições experimentais, utilizando, como caráter de seleção, a retomada do crescimento de raiz. Esse caráter é medido a partir do ponto de dano causado pelo Al^{3+} , caracterizado por um engrossamento e escurecimento das raízes devido paralisação no crescimento quando em soluções com Al^{3+} .

(Recebido para Publicação em 09/03/2006, Aprovado em 11/01/2008)

Quando as plantas são retiradas dessa condição e submetidas a soluções sem a presença de Al^{3+} , a raiz retoma a capacidade de crescimento, permitindo com isso quantificar, de forma efetiva, o nível de tolerância pelo maior ou menor comprimento na retomada do crescimento de raiz (SILVA et al., 2004). Contudo, muitas vezes, ocorre dificuldade de visualizar o dano causado pelo íon metálico, principalmente em espécies que não evidenciam o ponto de escurecimento como avevém e arroz, não permitindo que o nível de tolerância seja quantitativamente mensurado, o que muitas vezes pode acontecer com a aveia, quando as doses de alumínio não estão devidamente ajustadas na avaliação de genótipos que necessitam de concentrações maiores ou menores para facilitar a visualização. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes caracteres existentes tanto na parte aérea como no sistema de radicular de aveia que possam estar fortemente correlacionados com o caráter retomada do crescimento de raiz, avaliados em condições de hidroponia.

MATERIAL E MÉTODOS

Primeiramente, foi realizado um trabalho de caracterização das dezenove cultivares de aveia branca recomendadas para cultivo pela Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Aveia no ano de 2004, empregando a metodologia de cultivo hidropônico adicionando alumínio na solução. Neste trabalho, foram empregadas três doses do elemento químico, que foram: 0, 7 e 21 $mg L^{-1}$. No estudo, foi avaliado unicamente o caráter retomada do crescimento de raiz e crescimento de raiz para obtenção do percentual de redução em comparação a dose padrão, principalmente quando alguns genótipos evidenciavam dificuldade de avaliação do ponto de dano causado pelo alumínio. Foram selecionados três genótipos tolerantes e três sensíveis ao Al^{3+} que são: ALBASUL, UFRGS 15 e URS 22 (sensíveis); UPF 19, UPFA 22 e URS 20 (tolerantes).

Os genótipos selecionados foram submetidos a um novo experimento empregando a técnica de hidroponia em delineamento experimental completamente casualizado com três repetições e 200 plântulas de cada cultivar por repetição. A solução nutritiva padrão foi obtida a partir da diluição em 5,5 L de água destilada de: 65 mL de $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 78,4 $g L^{-1}$, 65 mL de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 40,92 $g L^{-1}$, 65 mL de KNO_3 33,57 $g L^{-1}$, 65 mL de $(NH_4)_2SO_4$ 4,77 $g L^{-1}$, 65 mL KH_2PO_4 65 $g L^{-1}$, 6,5 mL de Fe-EDTA 43,25 $g L^{-1}$ e 65 mL da solução de micronutrientes que é formada pela adição de: 10 mL de H_3BO_3 0,05146 $g L^{-1}$, 1 mL de $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 0,00201 $g L^{-1}$, 10 mL de NaCl 0,14567 $g L^{-1}$, 1 mL de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,01906 $g L^{-1}$, 1 mL de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0,00623 $g L^{-1}$ e 1 mL de $MnSO_4 \cdot H_2O$ 0,03702 $g L^{-1}$ a 2L de água destilada.

Anteriormente à implantação do experimento, 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 gaitas 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 germinadas, com aproximadamente 5 mm de raiz, foram transferidas para telas plásticas adaptadas às tampas de recipientes plásticos, com capacidade de 5,5 L, contendo solução nutritiva normal (solução padrão = sem alumínio) com pH regulado para 4,0 \pm 0,3.

Os baldes, contendo solução nutritiva e os genótipos para avaliação, foram colocados em tanque de hidroponia à temperatura de 25 °C, iluminação artificial permanente (1700 lx) e sistema de aeração para fornecimento adequado de oxigênio às raízes. Essas condições foram mantidas por 48 horas. Após, as telas (contendo as plântulas) foram colocadas em novos baldes de 5,5 L com solução nutritiva normal (10%) e doses de 0, 7 e 21 $mg L^{-1}$ de alumínio, permanecendo por mais 48 horas, em pH ajustado para 4,0 \pm 0,3, de modo a evitar a precipitação de compostos insolúveis, principalmente hidróxido de alumínio. Na última etapa deste procedimento, as telas retornaram à solução nutritiva normal, permanecendo por mais 72 horas, a fim de permitir a retomada do crescimento de raízes (RCR), principalmente dos genótipos tolerantes.

Para avaliação do efeito do Al^{3+} nos genótipos testados, foram mensurados os caracteres: estatura de plântula (EST), comprimento de raiz (CR), retomada do crescimento de raiz (RCR), comprimento do coleóptilo (CC), comprimento da primeira e segunda folha (CPF e CSF) e matéria seca da parte aérea e da raiz (MSPA e MSR). Das 200 plântulas de cada repetição por genótipo, foram selecionadas ao acaso e avaliadas 20 plântulas para mensuração dos caracteres mencionados, exceto MSPA e MSR, em que foram utilizadas todas as plântulas para as determinações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de variância (geral) apresentada na Tabela 1, é confirmada a diferença existente em pelo menos um entre os demais genótipos testados em todos os caracteres avaliados em hidroponia, o mesmo ocorrendo com o fator dose, indicando a existência de diferenças entre as concentrações de Al^{3+} , exceto para o caráter CC que não diferiu. Além disto, foi possível observar a existência de interação entre genótipo x dose, indicando a necessidade de desdobramento através da avaliação de seus efeitos simples. Neste sentido, a análise prosseguiu de modo a analisar o comportamento de cada genótipo individualmente para cada dose de Al^{3+} empregada no experimento.

Pela análise de variância (fixo) da Tabela 1, considerando as doses 0, 7 e 21 $mg L^{-1}$ de Al^{3+} , ao menos um entre os demais genótipos diferiram entre si para todos os caracteres mensurados, exceto CC na dose 21 $mg L^{-1}$. Este fato confirma que, nessa concentração do elemento químico, a possibilidade de uso deste caráter na seleção indireta é descartada, visto que não apresentou diferenças levando em consideração os dois grupos de genótipos avaliados (sensíveis e tolerantes).

Tabela 1. Resumo da análise de variância conjunta para os caracteres avaliados para os seis cultivares de aveia em diferentes concentrações de alumínio na solução, FAEM/UFPEL, 2005.

* Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F; QM = Quadrado médio, em centímetros, dos caracteres avaliados; EST= estatura de plântula; CR= comprimento de raiz; RCR= retomada do crescimento de raiz; CC= comprimento do coleótilo; CPF= comprimento da 1ª folha; CSF= comprimento da 2ª folha; MSPA= matéria seca de parte aérea.

Fonte de Variação (Geral)	GL	QM _{GERAL}							
		EST	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
Modelo	17	18,85*	8,15*	19,96*	0,09*	12,28*	13,57*	0,16*	0,06*
Genótipo (G)	5	57,53*	19,69*	5,94*	0,23*	38,02*	41,60*	0,43*	0,12*
Dose (D)	2	6,90*	17,42*	143,35*	0,02 ^{ns}	4,20*	8,26*	0,17*	0,07*
D x G	10	1,89*	0,52*	2,30*	0,03 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02*
Erro	36	0,67	0,24	0,09	0,02	0,94	0,49	0,02	0,004
Média Geral		23,38	4,66	2,32	3,13	17,55	3,73	2,44	0,52
CV (%)		3,49	10,57	12,79	4,45	5,52	18,77	6,11	12,37

Fonte de Variação (Fixo)	GL	QM _{0 mg L⁻¹}							
		EST	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
Gen/Dose	5	17,15*	9,75*	9,75*	0,15*	11,52*	15,63*	0,19*	0,05*
Erro	12	0,70	0,24	0,24	0,01	1,35	0,41	0,02	0,002
Média		24,05	5,58	5,58	3,11	18,06	4,50	2,44	0,58
CV (%)		3,49	8,82	8,82	3,80	6,43	14,29	6,36	8,16

		QM _{7 mg L⁻¹}							
Fonte de Variação (Fixo)	GL	EST	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
Gen/Dose	5	15,56*	7,27*	0,17*	0,06*	11,60*	10,74*	0,18*	0,03*
Erro	12	0,51	0,35	0,01	0,01	0,57	0,21	0,03	0,005
Média		22,83	4,77	0,77	3,12	17,10	3,22	2,54	0,46
CV (%)		3,13	12,33	14,71	3,45	4,43	14,10	6,72	14,94

		QM _{21 mg L⁻¹}							
Fonte de Variação (Fixo)	GL	EST	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
Gen/Dose	5	28,63*	3,72*	0,61*	0,09 ^{ns}	16,95*	16,46*	0,11*	0,09*
Erro	12	0,79	0,14	0,01	0,03	0,89	0,85	0,01	0,005
Média		23,27	3,62	0,62	3,17	17,48	3,49	2,34	0,51
CV (%)		3,82	10,26	15,90	5,72	5,40	26,53	4,94	14,28

Na Tabela 2, é possível verificar o desempenho médio dos caracteres testados em cada concentração do elemento químico. Assim, para a dose 0 mg L^{-1} de Al^{3+} , o caráter retomada do crescimento de raiz apresentou os mesmos valores observados para o comprimento de raiz, fato evidente, devido a ausência de alumínio na solução padrão não promover a paralisação no crescimento de raiz e conseqüentemente ausência de retomada do crescimento de raiz. Por este motivo, o RCR é igual ao CR. Nesta dose padrão, ficou evidente a separação dos grupos tolerante e sensível nos distintos genótipos avaliados quanto aos caracteres estatura de plântula, comprimento de raiz e matéria seca de raiz. Este fato indica a priori, a existência de diferenças genéticas entre os grupos testados. Já, os demais caracteres não distribuíram os genótipos testados nos distintos grupos de tolerância, indicando que pelo menos uma cultivar sensível ao alumínio evidenciou desempenho similar às do grupo tolerante e vice-versa. Ainda na Tabela 2, considerando a dose de 7 mg L^{-1} , foi verificado que os genótipos do grupo tolerante apresentaram os melhores

desempenhos do que os do grupo sensível para os caracteres EST, CR e RCR (caráter alvo de seleção), corroborando com os resultados obtidos na dose sem alumínio, ao contrário para a MSR, onde o genótipo UFRGS 15, do grupo sensível, evidenciou comportamento similar ao do grupo tolerante e UPFA 22, do grupo tolerante, apresentou comportamento semelhante aos de sensibilidade ao Al^{3+} . Os caracteres CC, CPF, CSF e MSPA também não apresentaram efetividade na separação entre os distintos grupos de tolerância.

Observação relevante nesta concentração de alumínio é que, de modo geral, ocorreu a presença de diferentes classes dentro de cada grupo de tolerância, ou seja, os cultivares tolerantes como a UPF 19 evidenciou maior RCR e EST, ao contrário do genótipo URS 20 que indicou maior CR e, nos cultivares do grupo sensível, todos expressaram o mesmo comportamento para o CR e RCR do que o genótipo ALBASUL que indicou menor EST.

Tabela 2. Valor médio de caracteres mensurado na raiz e parte aérea de plântulas de aveia (em centímetros), e da MSPA e MSR (em gramas) para as seis cultivares avaliadas sob concentrações de 0, 7 e 21 mg L⁻¹ de Al³⁺ na solução FAEM/UFPeI/2005.

Grupo	Genótipo	Doses de Al ³⁺ na solução							
		0 mg L ⁻¹							
		EST	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
T	UPF 19	26,53 a	7,13 a	7,13 a	3,20 a	19,67 a	5,43 b	2,61 abc	0,66 a
	UPFA22	25,52 a	6,71 a	6,71 a	3,24 a	19,47 a	5,03 b	2,65 ab	0,70 a
	URS 20	26,37 a	7,72 a	7,72 a	3,21 a	19,49 a	7,98 a	2,28 bcd	0,73 a
S	URS 22	22,38 b	3,70 b	3,70 b	2,82 b	16,93 ab	1,14 d	2,20 cd	0,51 b
	UFRGS 15	22,64 b	4,38 b	4,38 b	3,34 a	18,11 a	3,35 c	2,74 a	0,44 b
	ALBASUL	20,87 b	3,83 b	3,83 b	2,85 b	14,70 b	4,08 bc	2,18 b	0,45 b
7 mg L⁻¹									
T	UPF 19	26,08 a	5,93 b	1,13 a	3,31 a	19,83 a	3,63 b	2,79 a	0,59 a
	UPFA22	24,80 b	5,37 b	0,93 b	3,18 a	18,40 b	2,49 c	2,55 b	0,40 b
	URS 20	23,15 c	7,00 a	0,81 b	3,03 b	16,95 c	6,49 a	2,51 b	0,54 a
S	URS 22	21,47 d	3,14 c	0,63 c	2,92 b	16,37 c	0,80 d	2,33 b	0,32 b
	UFRGS 15	21,37 d	3,66 c	0,62 c	3,18 a	17,07 c	2,44 c	2,83 a	0,51 a
	ALBASUL	20,12 e	3,53 c	0,49 c	3,07 b	14,00 d	3,43 b	2,22 b	0,41 b
21 mg L⁻¹									
T	UPF 19	26,16 a	4,30 b	0,89 b	3,29 a	19,66 a	4,10 b	2,38 a	0,63 a
	UPFA22	26,98 a	4,00 b	0,89 b	3,36 a	20,07a	3,34 b	2,46 a	0,68 a
	URS 20	24,65 b	5,32 a	1,24 a	3,16 a	18,18 a	7,54 a	2,36 a	0,68 a
S	URS 22	21,03 c	2,74 c	0,34 c	3,09 a	16,14 b	0,43 c	2,13 b	0,33 b
	UFRGS 15	21,41 c	2,99 c	0,15 d	3,26 a	17,15 b	2,42 b	2,61 a	0,38 b
	ALBASUL	19,37 d	2,38 c	0,18 d	2,86 a	13,68 c	3,08 b	2,13 b	0,36 b

Médias não abrangidas pela mesma letra minúscula, na coluna, diferiram estatisticamente a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Scott Knott. T = tolerante ao Al³⁺ ; S = sensível ao Al³⁺; EST= estatura de plântula; CR= comprimento de raiz; RCR= retomada do crescimento de raiz; CC= comprimento do coleótilo; CPF= comprimento da 1ª folha; CSF= comprimento da 2ª folha; MSPA= matéria seca de parte aérea; MSR= matéria seca de raiz.

A dose de 7 mg L⁻¹ de Al³⁺ na solução parece não discriminar de maneira evidente os diferentes genótipos testados, podendo induzir a erros pela dificuldade de seleção, o que talvez tenha determinado a ausência de diferenciação entre os grupos tolerante e sensível para o caráter MSR (Tabela 2).

Considerando a dose mais elevada de alumínio empregada no experimento (21 mg L⁻¹) é possível perceber que o caráter RCR evidenciou, de maneira clara, diferenças

entre os dois grupos de genótipos analisados, e que os caracteres EST, CR, CPF e MSR mostraram comportamento semelhante. Os resultados apresentados reforçam a hipótese de que a MSR também pode proporcionar um caráter eficiente na seleção de plantas tolerantes ao Al³⁺. Além disto, o CPF que, nas doses 0 e 7 mg L⁻¹, não apresentou distinção entre os grupos de tolerância, nesta dose mais elevada parece representar um caráter promissor para seleção ao Al³⁺. Assim, é possível perceber que a dose

mais elevada de Al^{3+} realmente caracteriza de maneira eficiente genótipos tolerantes e sensíveis em aveia. Em relação às concentrações 7 e 21 $mg L^{-1}$ de Al^{3+} , levando em consideração os genótipos sensíveis, a de 21 $mg L^{-1}$ determinou uma redução visível no CR e RCR ao passo que na EST mostrou valores similares, indicando que a raiz é mais fortemente afetada pelo Al^{3+} do que a parte aérea em plântulas de aveia, sugerindo a hipótese de que os caracteres de raiz estejam mais correlacionados ao nível de tolerância ao Al^{3+} . Estudos realizados com milho por RAMÍREZ & BERENJEL (1984) demonstraram que linhagens tolerantes apresentam maior capacidade de translocar e acumular alumínio para a parte aérea da planta, onde linhagens sensíveis, pela reduzida capacidade de transporte acumulam maior quantidade no sistema radicular, aumentando conseqüentemente os danos à raiz.

Observação relevante é conferida ao caráter RCR nas duas concentrações de Al^{3+} , pois, em 7 $mg L^{-1}$, o genótipo UPF 19 evidenciou valor médio de 1,13 cm de RCR "a" e URS 20 de 0,81 "b", entretanto, na dose mais elevada do íon metálico, expressaram comportamento inverso, onde a cultivar URS 20 apresentou maior tolerância com 1,24 cm de RCR "a" e UPF 19 com 0,89 cm "b". Esta observação permite levantar a hipótese de que genótipos de elevada tolerância podem apresentar comportamentos similares a genótipos com maior sensibilidade, visto que em ambientes de menor concentração do elemento químico, não ocorre o desencadeamento dos mecanismos genético-fisiológicos da célula para reação aos efeitos do alumínio tóxico, indicando que para estas constituições genéticas, são necessários ambientes com elevadas concentrações do elemento químico para que ocorra expressão dos genes de tolerância, justificando sobremaneira a necessidade de adequação dos distintos níveis de tolerância dos genótipos aos diferentes sistemas e ambientes agrícolas de produção.

Para que a eficiência de seleção seja intensificada, grande importância deve ser conferida a estudos de caracteres correlacionados, possibilitando ao melhorista obter progressos mais rápidos do que a seleção direta no caráter desejado (CARVALHO et al., 2004). Desta forma, o conhecimento da associação entre os caracteres pode ser primordial quando o caráter de interesse revelar baixa herdabilidade ou difícil avaliação, como ocorre com a RCR quando o ponto de dano causado pelo alumínio não é verificado, não permitindo detectar com precisão o nível de tolerância dos genótipos. Neste sentido, foi realizada a análise de correlação (Tabela 3), empregando as cultivares dos distintos grupos de tolerância a fim de identificar no estágio de plântula e em condições de hidroponia, caracteres associados com a RCR.

Na dose padrão (sem Al^{3+}) é possível constatar a elevada correlação positiva entre EST x CR de 0,93, indicando que o incremento de um caráter tende ao acréscimo do outro e vice-versa. Além disto, foi possível observar a elevada associação também pronunciada entre EST x CPF de 0,91, mostrando que genótipos de maior CPF podem identificar indivíduos de maior estatura. Nesta dose padrão, os caracteres de parte aérea indicaram correlações significativas e positivas com EST, exceto para a MSPA. A ausência de associação entre EST x MSPA e a elevada correlação entre EST x MSR (0,83) determinam que genótipos de maior estatura tendem a evidenciar incremento na MSR ao passo que, na MSPA, esse aumento não é observado, indicando maior complexidade dos genes relacionados à expressão desses caracteres no estágio de plântula. Resultado similar também foi observado com o CR que evidenciou elevada associação positiva com a MSR (0,84) e ausência de correlação com a MSPA, evidenciando, deste modo, diferenças no acúmulo e direcionamento de minerais e compostos orgânicos entre raiz e parte aérea.

Tabela 3. Resumo da análise de correlação para caracteres avaliados nas doses 0, 7 e 21 $mg L^{-1}$ de Al^{3+} na solução, FAEM/UFPEL, 2005.

0 $mg L^{-1}$							
	CR	RCR	CC	CPF	CSF	MSPA	MSR
EST	0,93*	-	0,60*	0,91*	0,62*	0,24 ^{ns}	0,83*
CR			0,58*	0,79*	0,79*	0,23 ^{ns}	0,84*
CC				0,76*	0,40 ^{ns}	0,53*	0,36 ^{ns}
CPF					0,40 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,67*
CSF						0,13 ^{ns}	0,70*
MSPA							0,13 ^{ns}
7 $mg L^{-1}$							
EST	0,70*	0,92*	0,62*	0,91*	0,21 ^{ns}	0,51*	0,46 ^{ns}
CR		0,72*	0,40 ^{ns}	0,57*	0,72*	0,33 ^{ns}	0,59*
RCR			0,60*	0,85*	0,20 ^{ns}	0,49*	0,45 ^{ns}
CC				0,68*	0,11 ^{ns}	0,50*	0,52*
CPF					0,03 ^{ns}	0,60*	0,44 ^{ns}

CSF						0,04 ^{ns}	0,55*
MSPA							0,59*
21 mg L⁻¹							
EST	0,78*	0,82*	0,71*	0,95*	0,39 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,85*
CR		0,94*	0,44 ^{ns}	0,72*	0,74*	0,36 ^{ns}	0,88*
RCR			0,39 ^{ns}	0,71*	0,73*	0,17 ^{ns}	0,90*
CC				0,82*	-0,05 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,43 ^{ns}
CPF					0,26 ^{ns}	0,56*	0,75*
CSF						0,24 ^{ns}	0,65*
MSPA							0,39 ^{ns}

* Significativo a 5% de probabilidade de erro; EST= estatura de plântula; CR= comprimento de raiz; RCR= retomada do crescimento de raiz; CC= comprimento do coleótilo; CPF= comprimento da 1^a folha; CSF= comprimento da 2^a folha; MSPA= matéria seca de parte aérea; MSR= matéria seca de raiz.

Na dose 0 mg L⁻¹ de Al³⁺, todos os caracteres de parte aérea não evidenciaram associações com a MSPA, exceto para CC, e no caráter MSR, foi verificada correlação com os demais caracteres de parte aérea menos o CC e MSPA, indicando que provavelmente injúrias provocadas pelo Al³⁺ à raiz podem determinar maiores danos à MSR e aos demais caracteres de parte aérea da plântula. Portanto, a presença de Al³⁺ em solução nutritiva poderá primeiramente promover alterações na raiz e por seguinte no CC, CPF, CSF e EST, visto que, segundo LARSEN et al. (1998) a região do ápice radicular é o alvo primário da ação tóxica do elemento químico às plantas. Neste sentido, a hipótese poderá ser confirmada pela análise da Tabela 3, considerando a presença do elemento químico e do caráter RCR para a associação com os demais caracteres analisados em laboratório.

Na dose de 7 mg L⁻¹ de Al³⁺ é verificada a elevada associação positiva entre RCR x EST de 0,92, indicando que, nesta concentração, existe a possibilidade de selecionar genótipos tolerantes pelo emprego do caráter estatura de plântula. No entanto, esse critério de seleção pode apresentar restrições, visto que, a seleção pela EST pode proporcionar a obtenção de indivíduos de porte elevado, o que geralmente é indesejável pelo melhorista. O mesmo também foi observado para o CR e CPF, mesmo evidenciando associação com a RCR, também estão correlacionados com EST. Nesta concentração de Al³⁺ (7 mg L⁻¹), elevada associação positiva também foi observada entre CPF com EST de 0,91, evidenciando o mesmo valor observado na dose padrão. Logo, o CPF também pode ser indicado na seleção de genótipos de distintas estaturas.

Os caracteres EST, CR e CPF evidenciaram elevada correlação com o caráter RCR, indicando serem os mais promissores na tomada de decisão como segundo caráter de seleção na indicação de nível de tolerância quando a RCR não for visualizada. Os caracteres CC e MSPA evidenciaram uma reduzida associação com RCR, portanto, a pequena magnitude observada pode incrementar a probabilidade de erro no processo de seleção. Além disto, para a aveia, a dose de 7 mg L⁻¹ pode ser ineficiente na seleção de

genótipos tolerantes ao Al³⁺, visto que, SÁNCHEZ-CHACÓN et al. (2000) mostraram que nesta espécie, só a partir de 10 mg L⁻¹ foi permitida a distinção entre genótipos sensíveis e tolerantes ao elemento químico. Portanto, a dose empregada pode não evidenciar, de maneira clara, a correta associação entre os caracteres empregados no estudo. Aliados a isto, conforme observado na Tabela 2, de médias, os genótipos do grupo tolerante e sensível evidenciaram forte distinção na concentração mais elevada de Al³⁺, indicando, desta forma, a dose mais eficiente a ser utilizada sob condições de hidroponia. Conseqüentemente a dose de 21 mg L⁻¹ poderá determinar, com maior precisão, os caracteres mais efetivos a serem empregados como critério de seleção indireta em aveia.

Na Tabela 3, para a concentração de 21 mg L⁻¹ de Al³⁺ é possível observar a elevada correlação positiva entre a RCR com EST e CR de 0,82 e 0,94 respectivamente, indicando caracteres altamente viáveis na seleção de genótipos tolerantes. Além disto, elevada associação foi observada entre a RCR com MSR de 0,90, ao passo que RCR x MSPA evidenciaram ausência de correlação. Desta forma, estes resultados permitem indicar dois aspectos fundamentais: i) a seleção pela a MSR também é altamente eficiente na seleção de genótipos tolerantes ao Al³⁺ e, ii) os efeitos do alumínio são mais pronunciados nos caracteres de raiz do que na parte aérea, fundamentados pelas elevadas associações da RCR com CR e MSR. Logo, a MSPA é um caráter insensível na detecção de tolerância diferencial ao Al³⁺ entre os cultivares estudados, ao contrário da MSR. Contudo, os efeitos do Al³⁺ entre cultivares de cada espécie dependem, além da concentração do elemento químico, da idade da planta, do tempo de exposição ao meio de crescimento, composição, força iônica, pH e temperatura da solução nutritiva (KINRAIDE & PARKER, 1987; CARVER & OWNBY, 1995), podendo favorecer ou dificultar a ação do íon metálico na manifestação fenotípica de raiz e de parte aérea no processo de seleção através de caracteres correlacionados.

Os caracteres CPF e CSF, na dose mais elevada, indicaram associações positivas e significativas com RCR de

0,71 e 0,73 respectivamente, no entanto, o CSF não evidencia associação com EST, permitindo estabelecer, desta forma, que a seleção com base neste caráter não direciona simultaneamente a obtenção de indivíduos de porte elevado, ao contrário de CPF, CR e MSR, que para seleção visando a tolerância ao Al^{3+} deve proceder de uma cuidadosa observação por parte do melhorista. Em trigo, SILVA et al. (2006) empregaram aparelho medidor de área radicular na avaliação de plântulas sob estresse ao alumínio, identificando associação positiva com a RCR, sugerindo desta forma, que a aplicação conjunta destes dois caracteres podem permitir maior segurança na discriminação de genótipos sensíveis e tolerantes.

Portanto, o emprego dos caracteres mencionados que evidenciam associação com a RCR e empregando como parâmetro o comprimento relativo, em que são mensurados levando em consideração a dose padrão, pode permitir confiabilidade e segurança na seleção de genótipos superiores.

CONCLUSÃO

Os caracteres EST, CR, CPF, CSF e MSR podem ser utilizados na seleção indireta, visando ganho genético para tolerância ao Al^{3+} tóxico em aveia.

A dose de 21 mg L⁻¹ de Al^{3+} na solução nutritiva permite identificar com facilidade os genótipos sensíveis e tolerantes, além de possibilitar o reconhecimento, com precisão, dos caracteres alvo de seleção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez do alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.373-378, 2003.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C.; VÁZQUEZ, M.D. et al. Aluminum phytotoxicity. **Fertilizer Research**, The Hague, v.43, p.217-223, 1996.
- BASSO, L.H.M.; GONÇALVES, A.N.; SILVEIRA, L.V.A.; LIMA, G.P.P. Efeito do alumínio no crescimento de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivadas in vitro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.167-177, 2003.
- BENNET, R.J.; BREEN, C.M. The aluminium signal: new dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. **Plant and Soil**, Netherlands, v.134, p.153-166, 1991.
- 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**. Porto Alegre: Dep. de Solos. Fac. de Agronomia - UFRGS, 1995. p.51-76.
- CAMARGO, O.C.E. de; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de Cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.1, p.21-23, 1981.
- CARVALHO, F.I.F.; BENIN, G.; LORENCETTI, C. **Estimativas e implicações da correlação no melhoramento vegetal**. Pelotas: Ed. e Gráfica Universitária - UFPel, 2004. 142p.
- CARVER, B. F.; OWNBY, J.D. Acid soil tolerance in wheat. **Advances in Agronomy**, Madison, v.54, p.117-173, 1995.
- CECCON, G.; GRASSI FILHO, H.; BICUDO, S.J. Rendimento de grãos de aveia branca (*Avena sativa* L.) em densidades da plantas e doses de nitrogênio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1723-1729, 2004.
- DEGENHARDT, J.; LARSEN, P.B.; HOWELL, S.H. et al. Aluminum resistance in the *Arabidopsis* mutant *alr-104* is caused by an aluminum-induced increase in rhizosphere pH. **Plant Physiology**, Minneapolis, v.117, p.19-27, 1998.
- 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.
- FAGERIA, N.K. Tolerância diferencial de cultivares de arroz ao alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n.1, p. 1-9, 1982.
- FAGERIA, N.K. **Adução e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: Embrapa, 1984. 341p.
- FLEMING, A.L.; FOY, C.D. Root structure reflected differential aluminium tolerance in wheat varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.172-176, 1968.
- HOFER, K. Aluminiumsulfat-wirkung auf Sporangien und Zygoten. **Protoplasma**, New York, v.49, p.248-258, 1958.
- JONES, U.S. **Fertilizers & Soil Fertility**. Reston, 1979. 368p.
- KINRAIDE, T.B.; PARKER, D.R. Non-phytotoxicity of the aluminium sulfate ion, $AlSO_4^+$. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.71, p.207-212, 1987.
- LARSEN, P.B.; DEGENHARDT, J.; CHIN-YIN, T. et al. Aluminum-resistant *Arabidopsis* mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. **Plant Physiology**, Rockville, v.117, p.9-17, 1998.
- MAGISTAD, O.C. The aluminium content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. **Soil Science**, New Jersey, v.20, p.181-225, 1925.
- RAMIREZ, R.; BERENJEL, T. Influencia del aluminio sobre la acumulación y distribución del P, Ca, Mg y Al em líneas de maíz. **Agronomía Tropical**, Maracay, Venezuela, v.34, n.4-6, p.143-152, 1984.
- REID, D.; FLEMING, A.L.; FOY, C.D. A method for determining aluminium response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.63, p.600-603, 1971.
- 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.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.1, p.37-41, 2004.
- SILVA, S.A.; CARVALHO, F.I.F.; SILVA, J.A.G, et al. Toxicidade do alumínio e efeito do ácido giberélico em linhas quase isogênicas de trigo com o caráter permanência verde e maturação sincronizada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, 2006.
- ZHAO, X.J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, E.J. Al^{3+} and Ca^{2+} alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. **Plant Physiology**, Minneapolis, v.83, p.159-162, 1987.