

Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz⁽¹⁾

Steel Silva Vasconcelos⁽²⁾, Roberto Oscar Pereyra Rossiello⁽³⁾ e Jorge Jacob-Neto⁽⁴⁾

Resumo – Dois experimentos em casa de vegetação foram conduzidos visando identificar parâmetros morfológicos ligados à tolerância ao alumínio (Al) e estabelecer a concentração de Al e o tempo de cultivo suficientes para a expressão da tolerância ao Al, em duas cultivares de arroz, em solução nutritiva. Plantas de determinado comprimento radicular máximo foram transferidas para solução nutritiva com quatro concentrações de Al (0, 80, 160 e 320 $\mu\text{mol L}^{-1}$), a pH 4,0. Em cada coleta, foram medidos o comprimento máximo radicular, área radicular, área foliar e massa seca de raízes e parte aérea. Apenas os parâmetros morfológicos ligados ao sistema radicular possibilitaram o reconhecimento da tolerância diferencial das cultivares; a elongação radicular relativa foi a medida mais sensível. Quatro dias de exposição ao Al foram suficientes para a detecção da tolerância diferencial por meio da elongação radicular relativa. Os procedimentos estabelecidos nos experimentos podem ser utilizados para a avaliação de um número maior de cultivares.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, sistema radicular, elongação, solução nutritiva.

Morphological parameters to determine differential tolerance of rice cultivars to aluminium toxicity

Abstract – Two nutrient solution greenhouse experiments were conducted to identify morphological parameters that express Al tolerance and to determine the influence of period of plant growth and Al concentration necessary for tolerance discrimination, in two rice cultivars. Plants of known maximum root length were transferred to nutrient solution at four levels of Al (0, 80, 160 and 320 $\mu\text{mol L}^{-1}$) with a pH 4.0. In each collection, the new maximum root length was measured in addition to root and leaf areas, and root and shoot dry weights. Only the morphological parameters related to the root system differentiated Al tolerance of the cultivars, and relative root elongation was the most sensitive. Four days of exposure to Al were sufficient to detect differences in Al tolerance by means of relative root elongation. The methods established in this study can be useful in evaluating larger number of cultivars.

Index terms: *Oryza sativa*, root systems, elongation, nutrient solutions.

Introdução

Aproximadamente um terço dos solos dos trópicos apresenta naturalmente níveis de acidez e Al solúvel que limitam severamente o crescimento de

espécies agrícolas (Sanchez & Logan, 1992). A seleção de cultivares tolerantes à toxicidade de Al é um dos recursos mais importantes para se superar as restrições à produção agrícola nesses solos (Fageria et al., 1988).

Embora as bases celulares e moleculares das diferenças em tolerância à toxicidade do Al ainda não estejam esclarecidas (Larsen et al., 1998), sabe-se que a região do ápice radicular é o alvo primário da ação tóxica do alumínio. A toxicidade manifesta-se pela redução da taxa de elongação radicular após uma breve exposição das raízes às soluções contendo Al (Ryan et al., 1993). Efeitos subsequentes manifestam-se dias ou semanas após a exposição inicial ao Al como sintomas associados a uma forma crônica

⁽¹⁾ Aceito para publicação em 17 de maio de 2001.

Extraído da Dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ.

⁽²⁾ UFRRJ, Dep. de Solos, Caixa Postal 74570, CEP 23851-970 Seropédica, RJ. E-mail: steel@amazon.com.br

⁽³⁾ UFRRJ, Dep. de Solos, Bolsista do CNPq. E-mail: ropr@ufrj.br

⁽⁴⁾ UFRRJ, Dep. de Fitotecnia, Bolsista do CNPq. E-mail: jjacob@ufrj.br

de toxicidade (Parker, 1995), com a propagação dos efeitos tóxicos à parte aérea. Logo, os efeitos do Al entre cultivares de dada espécie vegetal dependem da idade da planta e do tempo de exposição e concentração de Al adicionado ao meio de crescimento, sendo ainda modificados por fatores como composição, força iônica, pH e temperatura da solução (Kinraide & Parker, 1987; Carver & Ownby, 1995).

Em arroz, existem diferenças definidas de tolerância à toxicidade de Al entre cultivares (Fageria et al., 1988), e diversos trabalhos têm mostrado diferenças entre linhagens e cultivares melhoradas de arroz de terra firme (Furlani & Hanna, 1984; Ferreira et al., 1995; Macedo et al., 1997; Vicente et al., 1998b). Entretanto, existem poucos estudos com variedades locais adaptadas à toxicidade de Al a partir da seleção feita pela agricultura familiar (Fageria & Zimmermann, 1979; Santos, 1991; Sivaguru & Paliwal, 1993a), e que podem fornecer uma boa fonte de tolerância ao Al em programas de seleção (Fageria et al., 1988). Por sua vez, ainda não há consenso entre os pesquisadores acerca dos parâmetros mais adequados como indicadores de diferenças varietais em tolerância ao Al em arroz (Hai et al., 1993; Macedo et al., 1997; Vicente et al., 1998a). A definição adequada de parâmetros de avaliação da tolerância ao Al entre cultivares de dada espécie vegetal tem sido enfatizada por Fageria & Baligar (1994) e Carver & Ownby (1995).

Este trabalho objetivou identificar parâmetros morfológicos ligados à tolerância ao Al e verificar a influência do tempo de cultivo e da concentração de Al na expressão da tolerância diferencial entre cultivares de arroz crescidas em solução nutritiva.

Material e Métodos

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, nos meses de maio a junho (experimento 1) e setembro a outubro (experimento 2) de 1996.

Sementes de arroz de terra firme cultivar Comum Branco, tolerante ao Al (Santos, 1991), e de arroz irrigado cultivar IAC 899, sensível ao Al (Furlani & Hanna, 1984), foram tratadas com hipoclorito de sódio (2% v/v) por 30 minutos, lavadas com água deionizada por 45 minutos e imersas em água deionizada por 24 horas antes da semeadura, em areia autoclavada a 120°C, por 20 minutos, a qual foi irrigada diariamente com água deionizada.

No experimento 1, selecionaram-se plântulas de 12 dias de idade apresentando comprimento radicular máximo (mm) de 61±18 (Comum Branco) e 111±18 (IAC 899), enquanto no experimento 2, selecionaram-se plântulas de 14 dias de idade de Comum Branco e IAC 899, apresentando comprimento radicular máximo (mm) de 89±10 e 81±11, respectivamente. No experimento 2, as plântulas foram crescidas por três dias em solução sem Al antes da sua adição ao meio. As plântulas foram transplantadas para vasos de plástico opacos contendo 1,88 L de solução-teste.

A solução-teste, a 50% da concentração descrita por Furlani & Furlani (1988), continha 0, 80, 160 e 320 µmol L⁻¹ de Al na forma de AlCl₃.6H₂O. O estoque de Al foi preparado segundo Kinraide & Parker (1987), com exceção do uso de 10 mmol L⁻¹ para evitar o preparo de grande volume de solução. O pH das soluções foi ajustado a 4,01±0,01 (experimento 1) e 3,99±0,02 (experimento 2) com HCl e KOH 0,1 mol L⁻¹. As soluções foram renovadas a cada dois (experimento 1) e três dias (experimento 2) e o pH determinado diariamente no vaso (experimento 1) e em uma alíquota de 10 mL (experimento 2), pipetada após agitação da solução-teste por alguns segundos em cada vaso (Sivaguru & Paliwal, 1993b).

Mantiveram-se 2 e 12 plântulas por vaso nos experimentos 1 e 2, respectivamente. A disposição dos vasos foi alterada diariamente de forma aleatória. A temperatura da casa de vegetação foi aferida diariamente à altura da parte aérea das plantas às 9h, 12h e 15h. No experimento 1, as plântulas cresceram à temperatura média de 30±5°C (com média das máximas de 36±5°C e de mínimas de 18±1°C), enquanto no experimento 2 a temperatura média de crescimento das plantas foi de 30±5°C, com registro de média das máximas de 37±3°C e média das mínimas de 20±1°C.

No experimento 1, realizou-se uma coleta aos nove dias após o transplante, enquanto no experimento 2 coletaram-se três plantas a cada quatro dias após o início do tratamento com alumínio. Em cada coleta, o comprimento radicular máximo foi medido novamente, obtendo-se os valores de elongação radicular relativa (ERR), conforme a seguinte equação, adaptada de Parker (1995):

$$ERR = \frac{(C_{f_{Al_x}} - C_{i_{Al_x}})}{(C_{f_{Al_0}} - C_{i_{Al_0}})} \times 100,$$

onde,

ERR: elongação radicular relativa (%);

$C_{i_{Al_x}}$: comprimento radicular máximo inicial (mm) antes da exposição ao nível "x" de Al;

$C_{f_{Al_x}}$: comprimento radicular máximo final (mm) após 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) de exposição ao nível "x" de Al;

$C_{i_{Al_0}}$: comprimento radicular máximo inicial (mm) antes da exposição ao nível 0 de Al; e

$C_{f_{Al_0}}$: comprimento radicular máximo final (mm) após 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) de exposição ao nível 0 de Al.

As medições da área foliar e radicular foram realizadas através de um medidor de área eletrônico portátil da marca LI-COR (Modelo LI-3000). A área das raízes foi estimada segundo Rossiello et al. (1995). Os pesos de massa seca foram obtidos após a secagem da parte aérea e raízes em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por, no mínimo, quatro dias.

Valores relativos de massa seca de parte aérea (MSRPA), de raízes (MSRR) e total (MSRT), e de área radicular (ARR) e foliar (AFR) foram calculados pela divisão dos valores absolutos em determinada concentração de Al pelos valores correspondentes ao controle (ausência de Al na solução nutritiva). Utilizaram-se valores relativos para minimizar diferenças inerentes às cultivares quanto às medidas de comprimento, área e massa seca (Jan & Pettersson, 1989).

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado em fatorial, com duas cultivares, quatro níveis de Al e três repetições (experimento 1) e com duas cultivares, quatro níveis de Al, quatro repetições e três coletas (experimento 2). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$) com o auxílio do programa estatístico SAEG da Fundação Arthur Bernardes.

Resultados e Discussão

A alongação radicular relativa (ERR) foi afetada significativamente pela interação entre nível de Al e cultivar nos experimentos 1 ($P < 0,05$) e 2 ($P < 0,001$) e decresceu com o aumento da concentração de Al na solução (Tabela 1). A cultivar Comum Branco superou significativamente a IAC 899 em ERR quando crescidas em solução com Al, comprovando a maior tolerância da cultivar de terra firme. Com base na ERR, Vasconcelos (1997) constatou diferença ainda maior em tolerância entre estas cultivares, em solução contendo apenas $CaCl_2$ e baixos níveis de $AlCl_3$ (10-20 $\mu\text{mol L}^{-1}$) a pH 4,0 durante 48 horas.

A falta de efeito significativo da interação tripla (nível de Al x cultivar x coleta) no experimento 2 significa que a ERR discriminou igualmente a tolerância das cultivares em qualquer das coletas. Desse modo, apenas quatro dias de exposição a 80 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al

foram suficientes para a identificação de diferenças em tolerância entre as cultivares, caracterizando uma extrema sensibilidade desse parâmetro para avaliação de cultivares. Vicente et al. (1998a) também evidenciaram maior sensibilidade do comprimento radicular em relação a parâmetros como peso da massa seca de raízes e parte aérea, quando cultivares de arroz foram expostas por 21 dias a níveis de Al entre 370 e 1.111 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Entretanto, Macedo et al. (1997) observaram que o comprimento radicular não discriminou a tolerância diferencial entre cultivares de arroz expostas a 500 e 1.000 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al durante 40 dias. Os resultados do presente trabalho indicam que o uso da ERR permite discriminar diferenças em tolerância ao Al entre cultivares de arroz em concentrações de Al muito mais baixas que as usadas em estudos precedentes, e em períodos mais curtos de exposição ao estresse.

Quanto à área radicular relativa (ARR), houve efeitos estatisticamente significativos da interação entre Al e cultivar ($P < 0,01$), no experimento 1, e da interação entre nível de Al, cultivar e coleta ($P < 0,05$), no experimento 2. A adição de Al à solução reduziu a ARR, como observado por Santos (1991) e Vicente et al. (1998a), embora a cultivar Comum Branco tenha apresentado aumento estatisticamente significativo em relação à ARR (Tabela 2). Em arroz, estímulo ao crescimento em razão do Al tem sido detectado na forma de promoção de comprimento e área radiculares, massa seca da parte aérea e raízes e altura de planta (Sivaguru et al., 1992; Macedo et al., 1997; Vicente et al., 1998a). Segundo Sivaguru & Paliwal

Tabela 1. Elongação radicular relativa (%) das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) em solução nutritiva contendo alumínio⁽¹⁾.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Experimento 1 ⁽²⁾		Experimento 2 ⁽³⁾	
	CB	IAC	CB	IAC
0	100Aa	100Aa	100Aa	100Aa
80	99Aab	77Bab	106Aa	73Bb
160	74Abc	53Bbc	87Ab	42Bc
320	73Ac	33Bc	71Ac	18Bd

⁽¹⁾Em cada experimento, letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; os coeficientes de variação foram de 13,7% (experimento 1) e 13,9% (experimento 2) e referem-se à análise de variância dos dados conjuntamente. ⁽²⁾Os dados são médias de três repetições, com duas plantas por repetição. ⁽³⁾Os dados são médias das três coletas, com quatro repetições por coleta e três plantas por repetição.

(1993a), parece que concentrações de Al baixas na solução estimulam o crescimento radicular e mesmo concentrações relativamente tóxicas podem ser benéficas para certos genótipos de arroz.

A cultivar Comum Branco apresentou ARR estatisticamente maior que a cultivar IAC 899 quando ambas foram submetidas ao estresse de Al, confirmando a maior tolerância da cultivar de sequeiro. Em alguns níveis de Al, a ARR da cultivar Comum Branco não foi estatisticamente diferente daquela da IAC 899, caracterizando menor sensibilidade desse parâmetro para a distinção da tolerância diferencial das cultivares ao Al em comparação com a ERR. Vicente et al. (1998a), entretanto, consideraram a ARR como o melhor sensor de tolerância ao Al em plântulas de arroz.

Além de menor sensibilidade que a ERR, a ARR fornece estimativas com maior variabilidade experimental (Tabelas 1 e 2), caracterizando uma desvantagem adicional de medições da área em relação às medições da elongação radicular. Este último aspecto é de certa forma esperado, pois a determinação da ERR pressupõe a pré-seleção de plantas em razão de um único eixo seminal, enquanto a ARR integra a variabilidade intrínseca do padrão de ramificação lateral.

Não houve efeito significativo das fontes de variação sobre a área foliar relativa (Tabela 3), impossibilitando o seu uso para o reconhecimento da tolerância diferencial ao Al entre as cultivares (Macedo et al., 1997). No entanto, Vicente et al. (1998a) consideraram a área foliar como um sensor de tolerância ao Al em arroz.

A massa seca relativa de raízes (MSRR) foi reduzida pela adição de Al à solução, como observado por Fageria et al. (1988) e Vicente et al. (1998a), porém tal efeito foi independente de cultivar no experimento 1 (Tabela 4). Apenas no experimento 2 houve efeito significativo da interação nível de Al x cultivar ($P < 0,01$), e não significativo da interação nível de Al x cultivar x coleta.

A expressão da maior tolerância da cultivar Comum Branco em relação à IAC 899 foi detectada apenas nos níveis 160 e 320 ($\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al), quando a primeira cultivar superou estatisticamente a segunda em MSRR (Tabela 4). Esse fato, aliado à não-distinção da tolerância entre as cultivares no experimento 1, caracterizou uma menor sensibilidade do parâmetro MSRR em relação à seleção de cultivares quando comparado a ERR e ARR. Geralmente, a MSRR representa um parâmetro com sensibilidade adequada para a distinção de tolerância entre cultivares de arroz em experimentos de longa duração (Santos, 1991; Macedo et al., 1997), de sensibilidade intermediária em experimentos de três a quatro semanas (Vicente et al., 1998a), e de baixa sensibilidade em experimentos de duração mais curta, como no presente caso.

No experimento 1, a massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) não foi afetada significativamente por nível de Al, cultivar ou interação entre nível de Al e cultivar. Apenas no experimento 2 as cultivares apresentaram resposta diferenciada ao estresse de alumínio. A interação entre nível de Al, cultivar e coleta afetou significativamente ($P < 0,05$) a MSRPA.

Tabela 2. Área radicular relativa (%) das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) em solução nutritiva contendo alumínio⁽¹⁾.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Experimento 1		Experimento 2 ⁽²⁾					
	CB	IAC	Dias após o início do tratamento com alumínio					
			4		8		12	
			CB	IAC	CB	IAC	CB	IAC
0	100Ab	100Aa	100Ab	100Aa	100Aa	100Aa	100Aa	100Aa
80	107Aab	58Bab	140Aa	63Bb	84Aab	85Aa	81Aab	72Ab
160	158Aa	47Bab	93Ab	44Bb	72Abc	27Bb	61Ab	38Ac
320	55Ab	37Ab	105Ab	41Bb	47Ac	26Ab	54Ab	29Bc

⁽¹⁾Letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; os dados são a média de três repetições, com duas plantas por repetição; os coeficientes de variação foram de 29,3% (experimento 1) e 24,4% (experimento 2) e referem-se à análise de variância dos dados conjuntamente. ⁽²⁾Em cada período, após o início do tratamento com Al, letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; os dados são médias de quatro repetições, com três plantas por repetição.

Quando as cultivares foram submetidas ao estresse de Al, com exceção das concentrações de 160 a 320 $\mu\text{mol L}^{-1}$ na terceira coleta, a IAC 899 apresentou MSRPA superior à de Comum Branco, sendo a diferença estatisticamente significativa em algu-

Tabela 3. Área foliar relativa (%) das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 9 dias em solução nutritiva contendo alumínio⁽¹⁾.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	CB	IAC
0	100	100
80	93	115
160	125	102
320	94	97

⁽¹⁾ Os dados são médias de três repetições, com duas plantas por repetição; o coeficiente de variação foi de 18,5% e se refere à análise de variância dos dados conjuntamente.

Tabela 4. Massa seca relativa de raízes (%) das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) em solução nutritiva contendo alumínio.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Experimento 1 ⁽¹⁾	Experimento 2 ⁽²⁾	
		CB	IAC
0	100a	100Aa	100Aa
80	93a	87Ab	94Aa
160	93a	79Abc	71Bb
320	74b	73Ac	59Bc

⁽¹⁾ Os dados são médias das duas cultivares (Comum Branco e IAC 899), com três repetições por cultivar e duas plantas por repetição; letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾ Os dados são médias das três coletas, com quatro repetições por coleta e três plantas por repetição; letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; os coeficientes de variação foram de 10,2% (experimento 1) e 11,2% (experimento 2) e referem-se à análise de variância dos dados conjuntamente.

Tabela 5. Massa seca relativa de parte aérea (%) das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 12 dias em solução nutritiva contendo alumínio⁽¹⁾.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Dias após o início do tratamento com alumínio					
	4		8		12	
	CB	IAC	CB	IAC	CB	IAC
0	100Aa	100Aa	100Aa	100Aab	100Aa	100Aa
80	97Aab	100Aa	90Bab	109Aa	84Bb	96Aa
160	91Aab	98Aa	81Bbc	92Ab	82Ab	81Ab
320	89Bb	107Aa	78Ac	81Ac	69Ac	62Ac

⁽¹⁾ Em cada período após o início do tratamento com Al, os dados são médias de três plantas por repetição, com quatro repetições por nível de Al; letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; o coeficiente de variação foi de 7,4% e refere-se à análise de variância dos dados conjuntamente.

mas concentrações de Al (Tabela 5). Esses resultados discordam da reconhecida tolerância diferencial ao Al entre as cultivares, evidenciada nos parâmetros anteriormente citados (Tabelas 1, 2 e 3). Logo, considerou-se a MSRPA um parâmetro insensível na detecção da tolerância diferencial ao Al entre as cultivares estudadas, provavelmente porque a massa seca da parte aérea é comumente menos afetada que parâmetros relativos ao sistema radicular (Jan & Pettersson, 1995).

Quanto à massa relativa total (MSRT), apenas no experimento 2 as cultivares apresentaram resposta diferenciada em relação aos níveis de Al na solução. Houve efeito significativo da interação entre nível de Al e cultivar ($P < 0,05$), enquanto a interação entre nível de Al, cultivar e coleta não afetou significativamente a MSRT.

A cultivar Comum Branco e a IAC 899 apresentaram MSRT estatisticamente iguais entre si, com exceção da concentração de 80 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Tabela 6), na qual IAC 899 foi superior a Comum Branco. Portanto, a MSRT não se caracterizou como um parâmetro sensível na detecção de tolerância diferencial ao Al (Jan & Pettersson, 1993). Entretanto, tais resultados discordam do estudo de Santos (1991), no qual a cultivar Comum Branco foi classificada como extremamente tolerante ao Al, com base na produção de massa seca total, quando submetida a uma condição de toxicidade crônica induzida por concentrações na faixa 370 a 1.111 mmol L^{-1} de Al, a pH 4,0. Santos (1991) e Macedo et al. (1997) sugeriram a porcenta-

gem de redução relativa da massa seca total como o parâmetro mais adequado na discriminação de diferenças varietais quanto à tolerância ao Al em arroz.

Os procedimentos utilizados nos experimentos permitiram discriminar a tolerância diferencial ao Al das cultivares Comum Branco e IAC 899. Logo, as faixas de concentração de Al utilizadas, o parâmetro de identificação da tolerância e o tempo mínimo para que haja expressão e, conseqüentemente, detecção da tolerância diferencial, entre outros detalhes dos procedimentos, podem ser aplicados para a avaliação de um número maior de cultivares de arroz.

A resposta diferenciada dos parâmetros de tolerância ao Al para a avaliação de cultivares de arroz encontrada na literatura decorre do uso de condições experimentais diferentes entre os diversos estudos, dificultando uma comparação adequada dos resultados. Esse problema poderia ser atenuado pelo estabelecimento de um procedimento comum de avaliação de plantas entre os diversos projetos de pesquisa ligados à seleção de cultivares de arroz tolerantes ao alumínio. O ajuste de procedimentos de avaliação por meio de medidas de comprimento ou alongação radiculares é ideal, pois, além de mais sensíveis e rápidos que aferições de massa seca ou fresca, permitem o uso das plantas em avaliações subseqüentes.

Tabela 6. Massa seca relativa (%) total das cultivares de arroz Comum Branco (CB) e IAC 899 (IAC) crescidas por 9 (experimento 1) e 12 dias (experimento 2) em solução nutritiva contendo alumínio.

Alumínio ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Experimento 1 ⁽¹⁾	Experimento 2 ⁽²⁾	
		CB	IAC
0	100ab	100Aa	100Aa
80	101ab	89Bb	99Aa
160	105a	83Ac	85Ab
320	90b	77Ac	77Ab

⁽¹⁾Os dados são a média das duas cultivares, com três repetições por cultivar e duas plantas por repetição; letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Os dados são médias das três coletas, com quatro repetições por coleta e três plantas por repetição; letras iguais, maiúsculas entre cultivares e minúsculas dentro de cultivar, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; os coeficientes de variação foram de 8,5% (experimento 1) e 7,8% (experimento 2) e referem-se à análise de variância dos dados conjuntamente.

Conclusões

1. Apenas os parâmetros morfológicos ligados ao sistema radicular permitem reconhecer a tolerância diferencial ao Al entre uma cultivar de terra firme adaptada à toxicidade de Al e uma cultivar de irrigação altamente sensível.

2. O uso da alongação radicular relativa como parâmetro de avaliação permite encurtar o tempo de exposição e diminuir as concentrações de Al necessárias à expressão de diferenças varietais em tolerância ao Al.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), pelo auxílio concedido para a realização deste trabalho; à Dra. Marlene Silva Freire, da Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, pela cessão das sementes utilizadas no trabalho.

Referências

- CARVER, B. F.; OWNBY, J. D. Acid soil tolerance in wheat. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 54, p. 117-173, 1995.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: MARANVILLE, J. W.; BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; YOHE, J. M. (Ed.). **Adaptation of plants to soil stress**. Lincoln: University of Nebraska/Intsomil-Usaid, 1994. p. 142-159.
- FAGERIA, N. K.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C. Rice cultivar response to aluminum in nutrient solution. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, n. 7/12, p. 1133-1142, 1988.
- FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 14, n. 2, p. 141-147, fev. 1979.
- FERREIRA, R. de P.; CRUZ, C. D.; SEDIYAMA, C. S.; FAGERIA, N. K. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio por técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 6, p. 789-795, jun. 1995.
- FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo**, Campinas, n. 121, p. 21-26, 1988.

- FURLANI, P. R.; HANNA, L. G. Avaliação da tolerância de plantas de arroz e milho ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 205-208, 1984.
- HAI, T. van; HOUBEN, V.; MBOUTI, C. N.; DUFEY, J. E. Diagnostic précoce de la résistance de cultivars de riz (*Oryza sativa* L.) à la toxicité aluminique. **Agronomie**, Paris, v. 13, p. 853-860, 1993.
- JAN, F.; PETTERSSON, S. Aluminium sensitivity of two upland rice cultivars at various levels of nutrient supply. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, n. 6, p. 1323-1335, 1995.
- JAN, F.; PETTERSSON, S. Effects of low aluminium levels on growth and nutrient relations in three rice cultivars with different tolerances to aluminium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 2, p. 359-372, 1993.
- JAN, F.; PETTERSSON, S. Varietal diversity of upland rice in sensitivity to aluminium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 12, n. 9, p. 973-993, 1989.
- KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Non-phytotoxicity of the aluminum sulfate ion, $AlSO_4^+$. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 71, p. 207-212, 1987.
- LARSEN, P. B.; DEGENHARDT, J.; TAI, C.; STENZLER, L. M.; HOWELL, S. H.; KOCHIAN, L. V. 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.
- MACEDO, C.; KINET, J. M.; SINT JAN, V. van. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminum sensitivity. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, n. 1, p. 181-193, 1997.
- PARKER, D. R. Root growth analysis: an underutilized approach to understanding aluminium rhizotoxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 171, p. 151-157, 1995.
- ROSSIELLO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétricos e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 5, p. 633-638, maio 1995.
- RYAN, P. R.; DITOMASO, J. M.; KOCHIAN, L. V. Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, p. 437-446, 1993.
- SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. (Ed.). **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of American, 1992. p. 35-46.
- SANTOS, M. de L. M. **Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.)**. Seropédica: UFRRJ, 1991. 176 p. Tese de Mestrado.
- SIVAGURU, M.; JAMES, M. R.; ANBUDURAI, P. R.; BALAKUMAR, T. Characterization of differential aluminum tolerance among rice genotypes cultivated in South India. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 2, p. 233-246, 1992.
- SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars: I. Growth performance. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 9, p. 1705-1716, 1993a.
- SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars: II. Mechanism of aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 9, p. 1717-1732, 1993b.
- VASCONCELOS, S. S. **Métodos de avaliação da tolerância à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.)**. Seropédica: UFRRJ, 1997. 137 p. Tese de Mestrado.
- VICENTE, F. M. P.; ROSSIELLO, R. O. P.; PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. I. Crescimento em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 9-15, jan. 1998a.
- VICENTE, F. M. P.; ROSSIELLO, R. O. P.; PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. II. Correlação canônica com produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 49-54, jan. 1998b.