



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ COLOMBIANOS  
AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

---

Londrina  
2013

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ COLOMBIANOS  
AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito.

Londrina  
2013

Catálogo elaborado pela Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

C764t Contreras, Mario Sandoval

Tolerância de cultivares de arroz colombianos ao alumínio em  
solução nutritiva / Mario Sandoval Contreras. – Londrina, 2013.  
67f. : il.

Orientador: Dr. Osmar Rodrigues Brito.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de  
Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação  
em Agronomia, 2013.

Inclui bibliografia.

1. *Oryza sativa* L – Teses. 2. Elongação radicular relativa – Teses. 3.  
Solução nutritiva – Teses. I. Brito, Osmar Rodrigues. II. Universidade Estadual  
de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU633.18

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ COLOMBIANOS  
AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adônis Moreira  
Embrapa/Soja

---

Prof. Dr. Pedro Rodolfo Sequeira Vendrame  
UEL – Londrina - PR

---

Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães  
UEL – Londrina - PR

---

Dr. Auro Akio Otsubo  
Embrapa/Dourados

---

Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito  
Orientador  
UEL – Londrina - PR

Londrina, 26 de fevereiro 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu amigo e orientador professor Doutor Osmar Rodrigues Brito pelos ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade que o tempo afirmou.

À todos os professores e pesquisadores que ajudaram na minha formação de alguma forma.

Ao meu grande amigo Emerson da Silva Teixeira e sua família, por toda a presteza, carinho, atenção e pelas palavras de estímulo em todos os momentos;

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Capes, pela bolsa concedida.

À todos os colegas de laboratório, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do laboratório do solo do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina

Aos meus colegas de curso de pós graduação pela convivência e amizade.

À minha família da Colômbia me deram força, coragem e esperança para ter sucesso neste projeto de vida, sem dúvida, minha esposa Camila Alejandra e minha filha Maria Fernanda mas especialmente a minha mãe e meu pai que hoje passa pelo momento mais difícil de sua vida, para eles com o maior amor.

CONTRERAS, Mario Sandoval. **Tolerância de cultivares de arroz Colombiano ao alumínio em solução nutritiva**. 2013. 67f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

## RESUMO

O alumínio do solo é um fator limitante de grande importância na produção agrícola de alimentos. Novos e mais produtivos cultivares de arroz são lançados a cada ano, indicando a necessidade de se buscar novas tecnologias, para incorporação de áreas menos férteis no processo de produção. O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação na Universidade Estadual de Londrina, utilizando uma solução nutritiva completa, acrescida de cloreto de alumínio hexahidratado ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). O pH das soluções foi ajustado a  $4,01 \pm 0,01$  mediante adição de pequenas quantidades da solução de HCl  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Foram utilizados vasos com capacidade para 2 litros de solução. O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos testados resultaram de um fatorial  $9 \times 5$  em que os fatores foram nove genótipos de arroz e cinco concentrações de Al. Os genótipos foram: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao alumínio) e a CNA-8521 (sensível) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, e o cultivar IAPAR-9, de origem brasileira e seis cultivares comerciais colombianos: Fedearroz-50, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-Mocari e Fedearroz-369. As cinco concentrações de Al na solução nutritiva foram: 0, 10, 20, 30 e  $40 \text{ mg L}^{-1}$ . A fase experimental teve duração de 30 dias e foram avaliadas as seguintes variáveis: comprimento máximo da raiz seminal, área foliar, massa seca de raízes e da parte aérea, alongação radicular relativa (ERR), massa seca relativa de raiz (MSRR), massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) e massa seca relativa total (MSRT). Os resultados obtidos permitiram concluir que as cultivares de origem colombiana são mais sensíveis à toxicidade do Al do que as brasileiras. A cultivar IAPAR-9 foi mais tolerante que as demais. Entre as cultivares colombianas a Fedearroz-Lagunas apesar de sensível, foi a que tolerou até  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, distinguindo-se das demais.

**Palavras-chave:** *Oryza sativa* L. Alongação radicular relativa. Solução nutritiva.

CONTRERAS, Mario Sandoval. **Tolerance of rice cultivars Colombian to aluminum in nutritive solution**. 2013. 67f. Dissertation (Master Degree in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

### ABSTRACT

The toxicity caused by aluminum is a limiting factor of great importance in agricultural food production, rice cultivars of high yield are developed each year with substantial production increase, indicating the need to seek new technologies for adaptation of plants under adverse conditions, in less fertile areas of exploration and production at decreased cost. The experiment was conducted in a greenhouse at the Universidade Estadual de Londrina, using a complete nutrient solution plus aluminum chloride hexahydrate ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). The pH of the solutions was adjusted to  $4.01 \pm 0.01$  by adding small amounts of HCl solution  $0.1 \text{ mol L}^{-1}$ . Was used pots with a capacity of two liters of solution. The experimental design was completely randomized with four replicates. The treatments resulted in a  $9 \times 5$  factorial in which the factors were nine rice genotypes from two strains of active germplasm bank of Embrapa Rice and Bean CNA-4164 aluminum-tolerant and sensitive CNA-8521, and seven commercial cultivars Fedearroz -50, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-Mocari and Fedearroz-369 of colombian origin and IAPAR-9 of brazilian origin, and five concentrations of Al in the nutrient solution (0, 10, 20, 30 and  $40 \text{ mg L}^{-1}$ ). The experimental phase lasted 30 days. Were evaluated the following variables: maximum length of the seminal root, leaf area, dry weight of roots and aerial parts, relative root elongation (ERR), relative root dry mass (MSRR), relative dry mass of shoots (MSRPA) and dry mass relative total (MSRT). The results allowed infer that the cultivars of Colombian origin are more sensitive to Al toxicity than the Brazilian. The IAPAR-9 was more tolerant than the other. Among the cultivars Colombian cultivar Fedearroz-Lagunas despite falls in the category of sensitive exhibited a high level of tolerance to Al (up to  $10 \text{ mg L}^{-1}$  Al), distinguishing itself from others.

**Key-words:** *Oryza sativa* L. Relative root elongation. Nutrientsolution.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	9
2.1 INTRODUÇÃO .....	11
2.2 ALUMÍNIO NO SOLO .....	11
2.2.1 Calagem no Solo .....	11
2.3 ALUMÍNIO E O CRESCIMENTO VEGETAL .....	13
2.4 ALUMÍNIO E A PLANTA DE ARROZ .....	15
2.4.1 Identificação de Plantas Tolerantes ao Alumínio .....	17
2.4.2 Parâmetros Morfológicos utilizados na Avaliação de Tolerância Alumínio .....	18
2.5 TESTES RÁPIDOS .....	19
2.5.1 Teste Rápido com Solução Nutritiva como Substrato .....	19
2.5.2 Testes Rápido com Solo como Substrato .....	20
2.6 TESTES DE LONGA DURAÇÃO .....	20
2.6.1 Avaliação com Solução Nutritiva como Substrato .....	20
2.6.2 Avaliação do Solo como Substrato .....	21
2.6.3 Usando casa de Vegetação .....	22
<b>3 ARTIGO A: TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ (ORYZA SATIVA, L) COLOMBIANOS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA</b> .....	23
INTRODUÇÃO .....	24
MATERIAL E MÉTODOS .....	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
CONCLUSÕES .....	52
REFERÊNCIAS .....	52
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	57
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura do arroz vem ocupando, cada vez mais, áreas de solos ácidos e de baixa fertilidade, o que limita a expressão do potencial produtivo de cultivares geneticamente melhorados.

A expansão do cultivo de arroz vem ocorrendo em torno das áreas tradicionais e em regiões antes não ocupadas pela agricultura. Nas duas situações a maior parte dos solos destas novas áreas apresentam baixa CTC e altos teores de alumínio trocável, além de baixa disponibilidade de fósforo.

As atuais cultivares de arroz utilizadas pelos rizicultores, são resultados de programas de melhoramento genético desenvolvidos com foco na seleção de materiais de alto potencial produtivo, entretanto, apresentam altas exigências nutricionais para expressarem esse potencial.

Os cultivares de arroz de sequeiro são mais rústicas e apresentam grande adaptação a diferentes condições ambientais, mas por outro lado, são menos produtivos. Esta situação gera a necessidade de busca constante por genótipos com algum nível de tolerância ao alumínio ou a outros tipos de restrições químicas. Neste processo se busca viabilizar a produção de alimentos em áreas de solos ácidos de baixa fertilidade de regiões onde não é economicamente viável o uso da irrigação.

A acidez do solo é um dos fatores que mais limita a produtividade das culturas. Nos solos ácidos ocorrem problemas de deficiência ou toxidez nutricional, cujos efeitos negativos podem ser amenizados mediante adoção de técnicas de manejo como: calagem, fertilização química, adubação verde, além de técnicas que visem a conservação e manutenção da matéria orgânica do solo (rotação de culturas, plantio direto, etc.), de forma a proporcionar melhores condições para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

De maneira geral os vegetais diferem bastante quanto ao grau de tolerância à acidez do solo. Às espécies apresentam diferentes características genéticas que determinam variações quanto a tolerância tanto intra como interespecíficas, e por conseguinte apresentam, diferentes magnitudes de resposta ao controle da acidez e do alumínio trocável do solo.

Avaliar e conhecer as características genéticas das plantas é fundamental para se recomendar o uso racional e econômico da calagem. Para o

arroz isto não é diferente, razão pela qual se busca sempre identificar os cultivares que sejam mais adaptados e produtivos em áreas de solos ácidos.

As técnicas de avaliação de genótipos quanto à tolerância ao alumínio têm sido desenvolvidas para avaliações em ambientes de laboratório, casa de vegetação e campo. No caso das gramíneas, os trabalhos desenvolvidos indicam a existência de altos e significativos coeficientes de correlação entre os resultados obtidos em laboratório e casa de vegetação e o desempenho dos cultivares a campo.

Outros trabalhos indicam que as características anatômicas, morfológicas e de crescimento do sistema radicular do arroz, são as variáveis mais sensíveis aos efeitos danosos do alumínio, e que poderiam ser utilizadas como indicativos de tolerância diferencial entre novos genótipos ou cultivares.

Dessa forma, este trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) desenvolvidos na Colômbia e no Brasil, quanto a tolerância ao alumínio em solução nutritiva.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos e produtos de origem agrícola cresce continuamente, visando atender tanto o crescimento das populações quanto as exigências de melhoria da qualidade de vida. Esta demanda exerce contínua pressão sobre o ambiente, exigindo a ocupação de novas áreas ou aumento da produtividade das culturas. A produção vegetal resulta de uma complexa interação entre o genótipo da planta e as condições ambientais. Entendê-las permite ao homem desenvolver técnicas alternativas de melhoramento vegetal, de manejo do solo e do ambiente que elevem a produtividade das culturas (FLOSS, 2004).

De acordo com Fageria e Stone (1999), dos fatores ambientais, o manejo do clima apresenta maior complexidade e é praticado em pequenas áreas. O solo, em compensação, pode ser facilmente modificado na suas camadas superficiais, alterando-se as propriedades físicas, químicas e biológicas, com objetivo de minimizar os efeitos de fatores de estresses que possam inibir a expressão máxima do potencial produtivo das culturas exploradas economicamente pelo homem.

Dentre dos atributos químicos do solo, as limitações causadas pela acidez e baixa concentração de nutrientes são facilmente superadas com a correção e a fertilização, práticas corriqueiras no meio agrícola que são utilizadas com o objetivo de se obter a máxima produtividade das culturas (FAGERIA; STONE, 1999).

As alterações do ambiente natural, através da construção de um sistema agrícola (agroecossistema) cria as condições necessárias para o bom desenvolvimento das plantas, entretanto, nem todas as espécies e cultivares de uma mesma espécie respondem de forma semelhante às correções das limitações ambientais (BASSINELLO, 1984; CÂMARA, 1993), havendo necessidade de condução de pesquisas específicas para avaliar as cultivares que se pretende explorar economicamente.

Estima-se que aproximadamente, 3,95 bilhões de hectares de terras agricultáveis do mundo, são afetados pela acidez (VON UEXKULL; MUTERT, 1995). Solos com esta característica ocorrem principalmente nas regiões tropicais e são considerados de aproveitamento marginal e de difícil adaptação à exploração

agrícola. Na maioria destes solos a toxidez causada pelo alumínio trocável é um dos fatores que mais limita a exploração agrícola para fins de produção de alimentos (KOCHIAN; JONES, 1997).

Nas regiões tropicais cerca de um terço dos solos apresentam naturalmente altos níveis de acidez e elevados teores de Al solúvel (SANCHEZ; LOGAN, 1992), logo a seleção de cultivares tolerante ou resistente ao Al é um dos recursos mais importantes para se superar estas restrições (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988).

Especificamente na Colômbia, país produtor de arroz, as savanas do leste, também chamada de região de Orinoco, ocupam uma área de cerca de 17 milhões de hectares. Dentro desta região existe a denominada Altillanura plana, com cerca de 3,4 milhões de hectares (COCHRANE; SÁNCHEZ, 1981), ocupando uma faixa de 60 km de largura ao sul do rio Meta, que se inicia nas proximidades da cidade de Puerto López (Meta) e se estende até a fronteira com a Venezuela (COCHRANE et al., 1985). A vegetação nativa predominante nesta área é composta, principalmente, por gramíneas de baixo valor nutritivo (ÁLVAREZ, 2000; PALADINES, 1999; KLEINHEISTERKAMP; HÄBICH, 1985) que é o principal fator determinante da baixa produtividade animal, característica desta região.

Segundo Sanz et al. (1999) os solos das áreas que representam a Altillanura, são classificados principalmente como oxisoils (Tropetric Haplustoxiso hypertermic), apresentam valores de pH em torno de 4,50, baixa disponibilidade de bases e alta saturação por Al (até 75%). Além disso, são solos muito suscetíveis à degradação física e sob condições naturais não são adequados para a produção de culturas e pastagens (AMÉZQUITA, 1998).

No mundo, e no Brasil em particular, os solos ácidos para serem incorporados ao processo produtivo, necessitam de uma correção via calagem, para adição de cálcio e magnésio bem como uma fertilização complementar, para adição de fósforo e outros nutrientes. Nestes solos é também de fundamental importância a adoção de técnicas de manejo que visem aumentar e conservar o conteúdo de matéria orgânica (NOVAIS et al., 2007).

## 2.2 ALUMÍNIO NO SOLO

A solubilidade do Al no solo e, conseqüentemente, sua toxidez são influenciadas por vários fatores, incluindo pH, tipo de argila predominante, concentração de sais na solução e teor de matéria orgânica do solo (FOY, 1974; SILVA, 1997).

A toxicidade do  $Al^{+3}$  aos vegetais é o fator mais limitante ao aproveitamento agrícola dos solos ácidos, principalmente quando o seu pH é menor que 5.0, situação em que a solubilidade de Al aumenta acentuadamente e representa mais de 50% da CTC do solo (EVANS; KAMPRAHT, 1970).

O alumínio influencia diretamente o crescimento do sistema radicular reduzindo a sua capacidade de absorção de água e nutrientes, e como consequência reduz também o crescimento da parte aérea das plantas sensíveis (POSCHENRIEDER et al., 2008). Especialmente no caso do fósforo ocorre uma reação de precipitação com o Al tornando-o menos solúvel, e indisponível para as plantas (SCHAFFERT et al., 2001).

### 2.2.1 CALAGEM NO SOLO

A calagem é a recomendação técnica mais eficiente para neutralizar e reduzir a toxicidade do alumínio dos solos ácidos e permite a incorporação de grandes áreas ao processo produtivo de uma região, além de corrigir a toxidez de alumínio, ferro e manganês das áreas de solos ácidos, serve também para adicionar quantidades apreciáveis de Ca e Mg (AZEVEDO; KÄMPF; BOHNEN, 1996; MIRANDA; MIRANDA, 2000), eliminando muitos fatores de estresse nutricional na cultura de arroz (DUARTE; VOLTAN; FURLANI, 1999). Entretanto, tem que se considerar como destacou Foy, (1984), que a calagem não é uma técnica adequada para neutralizar o alumínio e corrigir os teores de Ca e Mg das camadas mais profundas do solo.

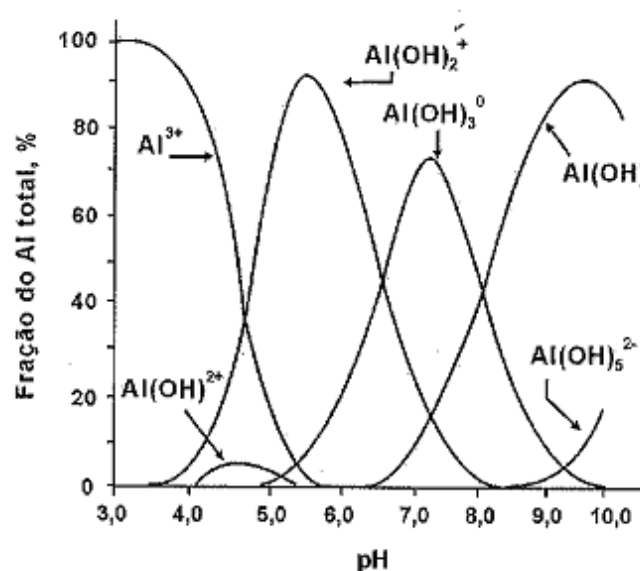
Outros autores (DUARTE; VOLTAN; FURLANI, 1999) que realizaram estudos para avaliação da calagem em arroz, observaram que em situação de solo inundado a aplicação de calcário além dos efeitos indicados anteriormente prevenia-se também o aparecimento de sintomas de amarelecimento das plantas, característico da toxicidade de ferro ou da deficiência de magnésio.

Mesmo sendo considerada como espécie adaptada às condições de solos ácidos (FAGERIA, 2000), há grandes diferenças entre os cultivares de arroz em termos de resposta à calagem ou quanto à tolerância ao Al (FAGERIA, 1982; FERREIRA; SALGADO; JORGE, 1986).

Dentre os cultivares brasileiros de arroz, Ferreira, Salgado e Jorge (1986) classificaram o 'IAC 47' como tolerante ao Al e não responsivo à calagem, enquanto o 'IAC 164' foi considerado sensível ao alumínio e responsivo à correção da acidez do solo, mediante emprego da calagem. Por outro lado, Furlani e Furlani (1991) classificaram estes cultivares como eficientes na utilização do P e tolerantes ao Al.

De acordo com Foy (1974), a severidade da toxidez do alumínio depende do valor de pH do solo e torna-se praticamente nula em solos com  $\text{pH} > 5,5$ .

**Figura 1** – Distribuição relativa das espécies de alumínio de acordo com o pH da solução.



Fonte: Marion et al. (1976)

Aumentos nos valores de pH do solo podem ser obtidos com a aplicação de produtos de reação alcalina como os calcários. Dependendo dos teores de magnésio os calcários podem ser classificados como: calcítico (< 5% de MgO), magnésiano (5 -12 % de MgO) ou dolomítico (>12 % de MgO) (FURTINI NETO;

TOKURA; RESENDE, 2004). Ainda de acordo com este e outros autores a escolha de um calcário para corrigir a acidez de um solo depende também dos teores e da relação entre o cálcio e o magnésio do solo, e do preço efetivo do calcário colocado na propriedade (preço real + custos de transporte/PRNT).

## 2.3 ALUMÍNIO E O CRESCIMENTO VEGETAL

### 2.3.1 Efeitos do Alumínio nas Plantas

Sintomas de toxicidade de Al ocorrem tanto nas células como nos órgãos vegetais (TAYLOR, 1995), porém a inibição do crescimento da parte aérea e, particularmente, do sistema radicular, são os efeitos mais frequentemente relatados (FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; DELHAIZE; RYAN, 1995), sendo a redução do crescimento radicular o sintoma mais facilmente reconhecido (DELHAIZE; RYAN, 1995). Porém para ZHANG e TAYLOR (1988), um importante sintoma precoce da fitotoxicidade de Al é a inibição da alongação radicular.

O sistema radicular é considerado como local inicial dos danos causados pelo Al (SCOTT; FISCHER; SPOHR, 1992), sendo o ápice radicular o sítio primário da inibição do crescimento da raízes induzida pelo Al (KOCHIAN, 1995), afetando especialmente a membrana plasmática de células da epiderme e do córtex externo (ISHIKAWA; WAGATSUMA; IKARASHI, 1996).

As reduções na alongação radicular causada pelo Al, quando em altas concentrações no meio, pode levar à morte do meristema do ápice radicular (SCOTT; FISHER, 1993) e com a exposição ao Al por períodos mais longos (dias), as raízes engrossam, tornam-se curtas e escurecidas (JACOB-NETO, 1993; ZHANG, TAYLOR, 1988). Além disso, as ramificações finas e os pêlos radiculares são extremamente reduzidos (CARE, 1995) e as raízes tornam-se quebradiças (FURLANI; CLARK, 1981). Na presença de Al, a área superficial e o volume dos pêlos radiculares diminuem (CARE, 1995) e as raízes laterais se iniciam mais próximas ao ápice radicular em comparação com plantas cultivadas na ausência de alumínio (STRID, 1996).

A redução da alongação radicular devido a toxidez do Al é um processo muito rápido (SCOTT; FISHER, 1993), tendo sido detectado experimentalmente após 1 hora em soja e caupi (HORST; KLOTZ, 1990;

HORTS;KLOTZ; SZULKIEWICS, 1990), após 1 a 3 horas em uma cultivar sensível de trigo (Scout 66) e após 1 hora em um cultivar de abóbora (LE VAN; KURAISHI; SAKURAI, 1994).

Em soja (*Glycine max*), a exposição do sistema radicular a concentrações de Al superiores a  $25 \mu\text{mol L}^{-1}$  reduziu a taxa de alongação radicular a cerca de 50% do valor obtido no controle (ausência de Al) após um período de apenas 2 horas (HORTS;ASHER; CAKMAK, 1992). Em outro trabalho com soja, a taxa de alongação radicular correspondeu à cerca de 80% do controle após 2 a 4 horas de exposição das raízes ao Al e decresceu para 60% após 4 a 6 horas de exposição (LAZOF; GOLDSMITH; RUFFY, 1994).

Em trigo (*Triticum aestivum. L*), o cultivar tolerante (Dade) e outro sensível (Romano) ao Al apresentaram reduções na alongação radicular quando expostas a  $4.5 \text{ mg L}^{-1}$  de Al (OLIVETTI;CUMMING; ETHELTON, 1995), sendo a redução inicial mais pronunciada na cultivar sensível. Entretanto, a cultivar tolerante apresentou recuperação da alongação radicular e suplantou as plântulas não expostas ao Al após 24 horas, ao passo que houve cessamento do crescimento radicular na cultivar sensível. Em milho, o tempo requerido para a indução de 5% de decréscimo nas taxas de alongação radicular foi menor nas cultivares sensíveis ao Al (LLUGANY; POSCHIENRIEDER; BARCELÓ, 1995). Isto pode ser um indicativo de que as cultivares tolerantes apresentam um certo metabólismo induzido pelo próprio Al para ativar os mecanismos de tolerância.

Os sintomas de toxicidade de Al visualizados na parte aérea para algumas plantas, se assemelham aos sintomas ligados à deficiência de P (redução geral do crescimento, folhas pequenas verde escuras com maturidade tardia e ramos com coloração purpúrea), ao passo que, em outras, assemelham-se a uma deficiência de Ca (enrolamento das folhas jovens e colapso do ápice do pecíolos) (FOY, 1983).

Em genótipos de arroz sensíveis ao Al, a presença desse elemento no substrato de crescimento induziu indiretamente a um estresse hídrico e fechamento dos estômatos (PALIWAL; SIVAGURU, 1994). Para Macedo, Kinet e Van Sint (1997) o Al promove necroses, reduções do comprimento e redução da área foliar, afetando a atividade fotossintética e reduzindo o crescimento da parte aérea de plantas de arroz .

### 2.3.2 Efeitos Benéficos do Alumínio

Pequenas quantidades de Al no substrato pode estimular o crescimento de espécies como sorgo (BALIGAR et al.,1995), cevada (REID; FLEMING; FOY, 1971) e algumas cultivares de arroz (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988). A concentração de Al que estimula o crescimento de plantas de arroz gira em torno de  $5 \text{ mg L}^{-1}$ , valor que pode ser maior se for aumentado o conteúdo de Mg da solução nutritiva (HAI; NGA; LAUDELOUT, 1989). Para estes autores, os teores de P da solução não exercem influência importante.

Se por um lado a aplicação de Al aumenta a resistência de cultivares de arroz a algumas pragas como *Sogatella furcifera* (Horváth), por outro, reduz o crescimento e a biomassa das plantas o que não é desejável (SALIM; SAXENA, 1992).

Os mecanismos pelos quais pequenas quantidades de Al beneficiam o crescimento vegetal podem ser diferentes para diferentes genótipos e meios de crescimento (FOY, 1984). Uma possível explicação para o estímulo seria um aumento na solubilidade e na disponibilidade do ferro no meio de crescimento resultante da hidrólise do Al e a consequente redução do pH (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979). Efeitos de estímulo por baixas concentrações de Al em genótipos de sorgo sensíveis parecem ser devidos ao aumento na produção de matéria seca e nas ramificações radiculares (BALIGAR et al., 1995), enquanto que para trigo (KINRAIDE, 1993) e milho (LLUGANY; POSCHIENRIEDER; BARCELÓ, 1995) foi atribuído ao efeito amenizador desse elemento sobre a toxicidade de prótons ou  $\text{H}^+$ .

### 2.4 ALUMÍNIO E A PLANTA DE ARROZ

Apesar de o arroz ser considerado como planta tolerante ao alumínio por muitos autores (ISHIKAWA; WAGATSUMA; SASAKI, 2000; KIKU et al., 2005), na realidade há uma grande variação entre cultivares, incluindo entre eles aqueles muito sensíveis (JAN; PETTERSSON, 1993; MATSUMOTO, 2000). De acordo com Okada, Fischer e Perez (2003), a produtividade dos cultivares sensíveis quando cultivados em áreas de solos ácidos e de baixa CTC foi positivamente correlacionada com os teores de cálcio do solo. Isto sugere que para estes cultivares

há necessidade de se fazer a correção do solo mediante adoção da prática da calagem, uma vez que a aplicação de calcários além de neutralizar o alumínio tóxico, aumenta os teores de cálcio e magnésio do solo.

A deficiência de magnésio comum em arrozais cultivados em solos ácidos, de acordo com Huang et al. (2009) está associada à inibição da absorção deste nutriente pelo alumínio que bloqueia as proteínas de membranas (MATSUMOTO, 2000) responsáveis pelo transporte do magnésio para o interior das células. Esta inibição pode ser atenuada pela adição de magnésio ao solo como observado por Yang et al. (2007) em planta de (*Vigna umbellata*). A solução para esta situação pode ser obtida com a prática da calagem que adiciona magnésio ao solo.

Ainda não há consenso entre os pesquisadores acerca dos parâmetros mais adequados para indicar a tolerância de cultivares de arroz ao Al (HAI et al., 1993; MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a). Mas, de acordo com Fageria e Baligar (1994) e Carver e Ownby (1995), a definição destes parâmetros deve ser perseguida como forma de acelerar e facilitar as investigações científicas para a busca de novos genótipos de arroz tolerantes a esse elemento.

Em plantas sensíveis a toxicidade do Al causa desorganização das estruturas e das funções das membranas, paralisação das mitoses, da síntese de DNA, enrijecimento das paredes celulares, redução no alongamento celular e distúrbios na assimilação e metabolização de nutrientes no ápice das raízes (DELHAIZE; RYAN, 1995).

Têm sido realizados numerosos estudos em solução nutritiva com intuito de caracterizar os danos causados pelas espécies iônicas de Al ao crescimento vegetal. De acordo com Kochian (1995) a toxidez manifesta-se primariamente alterando o meristema e a região de alongação celular, reduzindo a taxa de crescimento radicular.

Outros estudos indicam que a toxidez do alumínio além de reduzir o crescimento do sistema radicular, reduz também a absorção e utilização de nutrientes e o tamanho da parte aérea (FAGERIA et al., 1988, 1989; ROSSIELLO, 1995). Ao usarem esses sintomas e efeitos como indicadores de sensibilidade ou resistência de cultivares ao Al os resultados têm sido diversos. Fageria, Baligar e Wright (1989) consideraram que a produção de massa seca da parte aérea e das

raízes foi mais suscetível à toxidez de Al que o comprimento radicular ou altura da planta de arroz.

De acordo com Jan e Pettersson (1989) para plantas de arroz cultivadas na presença e ausência de Al a produção relativa de massa seca da parte aérea foi melhor indicadora de sensibilidade ao alumínio que a produção relativa de massa seca de raízes ou o comprimento radicular relativo. Para Mendonça (1991), que trabalhou com 50 genótipos de arroz de sequeiro, a produção relativa de massa seca total e a área radicular foram os indicadores mais apropriados para agrupar os cultivares em cinco classes de tolerância. Outros autores têm enfatizado que o comprimento radicular seja a característica mais adequada na diferenciação de cultivares de arroz quanto à tolerância ao Al (HOWELER; CADAVID, 1976; FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979; FURLANI; HANNA, 1984).

No processo de seleção de cultivares de arroz deve-se considerar a sensibilidade diferencial dos cultivares aos níveis de Al do substrato. Para alguns cultivares, baixas concentrações de Al na solução nutritiva estimula o crescimento das plântulas (FOY; DUKE; DEVINE, 1992; FREIRE et al., 1987), mas altas concentrações promovem severas reduções (FAGERIA, 1982; ROSSIELLO et al., 1995).

No entanto, para alguns cultivares, os efeitos positivos do aumento de doses de Al no acúmulo de massa seca pelo arroz parecem ser devidos ao bloqueio das superfícies negativas da parede celular, bloqueando o acesso dos íons  $Al^{3+}$  aos sítios eletronegativos, favorecendo a absorção de ânions, principalmente  $NO_3^-$  e  $H_2PO_4^{2-}$  (FREIRE et al., 1987). Fageria, Wright e Baligar (1988) sugeriram que o efeito benéfico está relacionado a um aumento na absorção de nutrientes pelas plantas de arroz, enquanto que Hai et al. (1989) o atribuíram à entrada passiva de Al e fosfato na forma de um complexo de baixa carga positiva nas raízes da planta de arroz.

#### 2.4.1 Identificação de Plantas Tolerantes ao Alumínio

O desenvolvimento de métodos rápidos, eficientes e de baixo custo operacional para avaliação de plantas tolerantes à toxicidade de Al é de extrema importância, pois permite aceleração dos programas de melhoramento genético (FURLANI, HANNA, 1984; LITTLE, 1988). Técnicas de seleção para tolerância ao Al

normalmente se baseiam na exposição de plântulas ao Al em solução nutritiva ou em solo e subseqüentes medições da inibição do crescimento radicular (HORTS; KLOTZ, 1990). Métodos rápidos de laboratório e casa de vegetação são amplamente utilizados na seleção de cultivares de diferentes plantas quanto a tolerância a Al. Normalmente não são destrutivos e podem ser empregados em estádios precoces de desenvolvimento das plantas de arroz (CARVER; OWNBY, 1995).

De acordo com Scott e Fisher (1993), um método de seleção ideal deve ter as seguintes características: alta correlação entre os resultados da seleção em ambiente controlado e a performance no ambiente alvo; possibilitar o trabalho com grandes populações; diferenciar os genótipos estudados; elevada reprodutibilidade de resultados e não ser destrutivo.

#### 2.4.2 Parâmetros Morfológicos Utilizados na Avaliação da Tolerância Alumínio

Uma séria limitação à pesquisa da tolerância ao Al é o método de seleção utilizado. Tais métodos variam amplamente entre programas que pesquisam fontes, concentrações de Al, pH do substrato, meios de crescimento e características da planta que são avaliadas (FOY; DUNCAN; WASKOM, 1993). O desenvolvimento de um método rápido de seleção de espécies ou cultivares para tolerância ao Al requer a escolha correta dos fatores que afetam a toxicidade, bem como de parâmetros de fácil avaliação que sejam suficientemente sensíveis para discriminar as diferenças de tolerância entre as cultivares avaliadas (CAMBRAIA; SILVA; CANO, 1991).

Ainda há divergências quanto às melhores características da planta que podem ser utilizadas como medidas para identificar a tolerância ao Al (MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997). Diversos autores têm considerado a alongação radicular como o parâmetro morfológico mais sensível à toxicidade de Al em diversas espécies (MOUSTAKAS; OUZOUNIDOU; SYMEONIDIS, 1992). Segundo Zhang e Taylor (1988), a tolerância ao Al pode ser avaliada principalmente pela medida do crescimento das raízes que é mais sensível que o crescimento da parte aérea como indicado por Fageria, Wright e Baligar (1988). É comum a verificação de um aumento da relação parte aérea/raiz em plantas submetidas a níveis crescentes de Al (STRID, 1996), demonstrando que as raízes são afetadas mais intensamente

que a parte aérea (JAN; PETTERSSON, 1995).

Na classificação de cultivares de arroz para tolerância ao Al, Jan e Petterson (1989) relataram que a massa fresca relativa da parte aérea de plantas de arroz foi mais adequada que a do sistema radicular devido aos severos danos causados às raízes, independentemente da sensibilidade das cultivares ao Al. Contudo Macedo, Kinet e Van Sint. (1997) acreditam que apenas um parâmetro morfológico isolado não pode ser utilizado como critério para distinção de graus de sensibilidade de plantas de arroz ao Al.

## 2.5 TESTES RÁPIDOS

O rápido efeito da toxicidade de Al na alongação e na morte do meristema radicular é a base de muitos testes rápidos para tolerância ao Al em plantas.

A importância dos testes de curta duração não está no fornecimento de uma medida precisa de todos os aspectos da tolerância a solos ácidos, mas na exclusão de materiais que provavelmente não teriam desempenho satisfatório para a produção comercial. Não é essencial que o estresse aplicado reproduza exatamente o estresse dos solos ácidos; entretanto, os resultados devem ter uma correlação razoável com a performance da planta no campo (SCOTT; FISHER, 1993).

### 2.5.1 Teste Rápido com Solução Nutritiva como Substrato

Para o estudo dos efeitos da toxicidade do Al, sobre a seleção de genótipos tolerantes, diversos autores têm usado testes rápidos em soluções nutritivas simples para avaliação da alongação radicular (KINRAIDE; ARNOLD; BALIGAR, 1985), para o estudo da relação entre espécies iônicas de Al e a sua fitotoxicidade (PARKER; KINRAIDE; ZELAZNY, 1988) e para a identificação de mecanismos de toxicidade (WAGATSUMA et al., 1995) e de tolerância ao Al (TICE; PARKER; DEMASON, 1992).

Quando livre de agentes complexantes, a solução nutritiva pode manter apenas uma espécie de Al e dessa forma, a atividade do Al não é muito diferente de sua concentração nominal (HILL; AHLRICH; EJETA, 1989).

De acordo com Taylor et al. (2000); Barceló e Poschenreider (2000)

o íon  $Al^{3+}$  é uma importante espécie iônica que causa toxicidade às plantas, tanto no apoplasma, na superfície externa da membrana plasmática, nos vacúolos ou ainda em exsudados xilemáticos.

### 2.5.2 Teste Rápido com Solo como Substrato

Testes de curta duração (2 a 4 dias), usando o crescimento radicular de plântulas crescidas em recipientes com terra têm sido utilizados com sucesso para avaliar rapidamente uma grande quantidade de solos quanto a biodisponibilidade do Al ou para avaliação da tolerância ao Al em genótipos de plantas (WRIGHT, 1989).

Nos testes rápidos conduzidos por 48 horas assume-se que todos os nutrientes necessários ao crescimento inicial estão presentes na semente ou no solo, e que a fotossíntese e absorção de nutrientes ainda não são críticas ao crescimento. Assim, a principal observação é a resposta morfofisiológica da raiz seminal à toxicidade do Al (HILL; AHLRICHS; EJETA, 1989; AHLRICHS et al., 1991).

Para seleção de rotina, o uso de pequenas quantidades de terra com Al tóxico em placas de petri, apresenta a vantagem de ser um sistema natural que pode ser montado utilizando amostras de solos dos locais de interesse e uma grande quantidade de materiais genéticos (HILL; AHLRICHS; EJETA, 1989). Porém o teste definitivo, sem dúvida, consiste no cultivo das plantas no campo (FOY; DUKE; DEVINE, 1992).

## 2.6 TESTES DE LONGA DURAÇÃO

### 2.6.1 Avaliação com Solução Nutritiva como Substrato

A solução nutritiva permite que fatores individuais da acidez do solo sejam estudados sob condições controladas, superando, assim, muitos problemas associados com os estudos realizados com solo (BLAMEY; ASHER, 1993). A vantagem deste método reside na maior facilidade de condução e manipulação das plantas para posterior observação do sistema radicular e avaliação das respostas à toxicidade de Al de materiais genéticos diversos (FURLANI; HANNA, 1984).

Em estudos feitos em solução nutritiva, pode-se controlar com

precisão a concentração de Al e de outros elementos, e o pH da solução (CARVER; OWNBY, 1995). Além disso, após a seleção, as plantas classificadas como tolerantes podem ser transplantadas para o solo e utilizadas em programas de melhoramento (KERRIDGE; DAWSON; MOORE, 1971).

Os testes com utilização de solução nutritiva em casa de vegetação normalmente são mais rápida que os métodos de campo, permitem a avaliação de uma maior quantidade de germoplasmas em um curto período de tempo e reduz a quantidade de germoplasma a ser testados no campo (DUNCAN; CLARK; FURLANI, 1983; BALIGAR et al., 1989).

O cultivo em solução nutritiva é adequado para a seleção de genótipos de arroz tolerantes ao Al (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979; FURLANI; HANNA, 1984). Funciona apenas como método pré-seletivo e não substituem a seleção feita no campo (FURLANI; HANNA, 1984).

#### 2.6.2 Avaliação do Solo como Substrato

O método direto de seleção para tolerância à acidez do solo é a produção econômica sob condições de campo. O resultado é uma media integrada da tolerância expressa durante o desenvolvimento da planta (CARVER; OWNBY, 1995). As avaliações de campo podem envolver a seleção de plantas individuais, a identificação de linhagens promissoras ou a avaliação de novos materiais antes da liberação de cultivares comerciais (SCOTT; FISCHER, 1993).

Experimentos de campo, embora necessários para a avaliação da tolerância de plantas a solos ácidos, são muitos trabalhosos, demorados e os resultados são afetados pelas variabilidades intrínsecas de cada solo (URREA-GÓMEZ et al., 1996) e pela resistência diferencial dos cultivares ao ataque de pragas e doenças. Além disso, há dificuldades para isolar os efeitos do excesso de Al de outros componentes da acidez do solo (HORTS, 1985).

### 2.6.3 Usando Casa de Vegetação

Experimentos em casa de vegetação podem se aproximar das condições de campo, porém requerem uma considerável quantidade de tempo e espaço para avaliação de poucos genótipos (GARLAND; CAMPBELL; CARTER, 1990). Além disso, o uso de solo como meio de seleção apresenta problemas de variabilidade causada pelo local de coleta, tempo de coleta, preparo e condições de armazenamento das amostras (SCOTT; FISCHER, 1993).

### 3 ARTIGO A

## TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa*, L.) COLOMBIANOS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

Mario Sandoval Contreras<sup>1</sup>

**Resumo:** A toxidez causada por alumínio é um fator limitante de grande importância na produção agrícola de alimentos, cultivares de arroz de alto rendimento são desenvolvidas a cada ano com aumento substancial da produção, indicando a necessidade de buscar novas tecnologias para adaptação de plantas em condições adversas, na exploração de áreas menos férteis e custos decrescentes na produção. O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual de Londrina, utilizando uma solução nutritiva completa, acrescida de cloreto de alumínio hexahidratado ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). O pH das soluções foi ajustado a  $4,01 \pm 0,01$  mediante adição de pequenas quantidades da solução de  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Foram utilizados vasos com capacidade para 2 litros de solução. O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos testados resultaram de um fatorial  $9 \times 5$  em que os fatores foram nove genótipos de arroz e cinco concentrações de Al. Os genótipos foram: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao alumínio) e a CNA-8521 (sensível) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, e o cultivar IAPAR-9, de origem brasileira e seis cultivares comerciais colombianos: Fedearroz-50, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-Mocari e Fedearroz-369. As cinco concentrações de Al na solução nutritiva foram: 0, 10, 20, 30 e  $40 \text{ mg L}^{-1}$ . A fase experimental teve duração de 30 dias e foram avaliadas as seguintes variáveis: comprimento máximo da raiz seminal, área foliar, massa seca de raízes e da parte aérea, alongação radicular relativa (ERR), massa seca relativa de raiz (MSRR), massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) e massa seca relativa total (MSRT). Os resultados obtidos permitiram concluir que as cultivares de origem colombiana são mais sensíveis à toxidez do Al do que as brasileiras. A cultivar IAPAR-9 foi mais tolerante que a demais. Entre as cultivares colombianas a Fedearroz-Lagunas apesar de sensível, foi a que tolerou até  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, distinguindo-se das demais.

**Palavras-chave:** *Oryza sativa* L. Elongação radicular relativa. Solução nutritiva.

---

<sup>1</sup> Aluno do curso de Mestrado em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina.

## INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa L.*) é uma das fontes básicas de alimentação da humanidade, e com o aumento populacional, a crescente demanda por arroz pode ser atendida pela intensificação da sua produção em ambientes adversos como os solos ácidos, altamente intemperizados (JAN; PETERSON, 1995).

No Brasil, o sistema de produção de arroz de terras altas representa aproximadamente 60% da área cultivada, 40% da produção global (SILVA, 2006). Segundo dados da CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2010), a produção brasileira de arroz na safra 2009/10, totalizou 11,2 milhões de toneladas, com área cultivada de 2,7 milhões de hectares e produtividade média de 4073 kg ha<sup>-1</sup>.

A avaliação de cultivares de arroz para tolerância ao Al pode ser realizada em solo ácido ou solução nutritiva (SANTOS, 1991; FERREIRA et al., 1995; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a), uma vez que, há razoável concordância de resultados entre esses métodos Howeler e Cadavid (1976).

Há vários procedimentos descritos para avaliações em solução nutritiva, as quais diferem em composição, pH, frequência de renovação, tempo de exposição ao estresse de Al e escolha dos parâmetros para avaliação da tolerância. Apesar da toxicidade se expressar primariamente no sistema radicular (FOY et al., 1993b), alguns autores utilizam parâmetros relativos à parte aérea para discriminar cultivares de arroz tolerantes ao Al (FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; JAN; PETERSON, 1989).

Sintomas de toxicidade de Al ocorrem tanto nas células como nos órgãos vegetais (TAYLOR, 1995), porém a inibição do crescimento da parte aérea e, particularmente, do sistema radicular, são os efeitos mais frequentemente relatados. O sistema radicular é considerado como local inicial dos danos causados pelo Al (SCOTT; FISCHER; SPOHR, 1992). O ápice radicular é considerado o sítio primário da ação tóxica causada pelo Al (KOCHIAN, 1995), que afeta especialmente a membrana plasmática das células da epiderme e do córtex externo (ISHIKAWA; WAGATSUMA; IKARASHI, 1996).

Um dos sintomas iniciais da fitotoxicidade de Al é a inibição da alongação radicular (ZHANG; TAYLOR, 1988). Porém, quando em altas concentrações o Al pode levar à morte do meristema do ápice radicular (SCOTT;

FISHER, 1993).

Quando a exposição ao Al se dá por períodos mais longos (dias), as raízes engrossam, tornam-se curtas e escurecidas (JACOB NETO, 1993; ZHANG, TAYLOR, 1988). Além disso, as ramificações finas e os pêlos radiculares são extremamente reduzidos (CARE, 1995) e as raízes tornam-se quebradiças (FURLANI; CLARK, 1981).

Na presença de Al, a área superficial e o volume dos pêlos radiculares diminuem (CARE, 1995) e as raízes laterais se iniciam mais próximas ao ápice radicular em comparação com plantas cultivadas na ausência de alumínio (STRID, 1996). Além disso, outros sintomas da toxicidade de Al podem ser visualizados na parte aérea das plantas (MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997). Em algumas plantas os sintomas de toxidez do Al são semelhantes àqueles ligados à deficiência de P, ao passo que, em outras, assemelham-se a uma deficiência de Ca (FOY, 1983).

Diversos autores têm considerado a alongação radicular como o parâmetro morfológico mais sensível à toxicidade de Al por diversas espécies (MOUSTAKAS; OUZOUNIDOU; SYMEONIDIS, 1992). Segundo Zhang e Taylor (1988) a tolerância ao Al pode ser avaliada mediante o crescimento das raízes que é mais sensível que o crescimento da parte aérea (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988). É comum ocorrer o aumento da relação matéria seca da parte aérea/matéria seca das raízes em plantas submetidas a níveis crescentes de Al (STRID, 1996), demonstrando que as raízes são afetadas mais intensamente que a parte aérea (JAN; PETERSSON, 1995).

Para estudar os efeitos da toxicidade do Al, visando a seleção de genótipos tolerantes, diversos autores têm usado testes em soluções nutritivas para avaliação da alongação radicular (KINRAIDE; ARNOLD; BALIGAR, 1985). Nesta condição pode-se avaliar componentes individuais da acidez, evitando assim, muitos problemas associados aos estudos conduzidos com solo (BLAMEY; ASHER, 1993). Em solução torna-se mais fácil a execução de estudos para avaliar os efeitos individuais das espécies iônicas de Al (PARKER; KINRAIDE; ZELAZNY, 1988) e para identificar os mecanismos relacionados à toxicidade (WAGATSUMA et al., 1995) e tolerância a este elemento (TICE; PARKER; DEMASON, 1992).

Os métodos baseados na utilização de solução nutritiva em casa de vegetação são de execução mais rápida que aqueles de campo, permitem avaliação

de uma maior quantidade de germoplasmas em um curto período de tempo e reduz a quantidade de germoplasma a serem testados no campo (DUNCAN; CLARK; FURLANI, 1983; BALIGAR et al., 1989). De acordo com Fageria e Zimmermann (1979), Furlani e Hanna (1984) a solução nutritiva é adequada para a seleção de genótipos de arroz tolerantes ao Al. No entanto, deve-se destacar que as avaliações em solução nutritiva não substituem a seleção no campo, funcionando apenas como método de pré seleção (FURLANI; HANNA, 1984).

Apesar de muitos autores (ISHIKAWA; WAGATSUMA; SASAKI, 2000; KIKUI et al., 2005) considerarem o arroz ser como planta tolerante ao alumínio por o nível de tolerância é uma característica genética que varia de cultivar para cultivar (JAN; PETTERSSON, 1993; MATSUMOTO, 2000).

Considerando as informações apresentadas anteriormente, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar diferentes genótipos de arroz quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva.

## **Material e Métodos**

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, utilizando vasos com capacidade para 2 litros de solução nutritiva completa. O delineamento experimental usado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos resultaram de um fatorial 9 x 5 em que os fatores foram nove genótipos de arroz e cinco concentrações de Al na solução nutritiva. Os genótipos testados foram: i) origem brasileira: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao alumínio) e a CNA-8521 (sensível) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, e o cultivar IAPAR-9; ii) seis cultivares comerciais de origem colombiana: Fedearroz-50, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-Mocari e Fedearroz-369. As cinco concentrações de Al na solução nutritiva foram: 0, 10, 20, 30 e 40 mg L<sup>-1</sup>.

As concentrações de alumínio foram obtidas mediante adição quantidades adequadas de uma solução estoque preparada com o cloreto de alumínio hexahidratado (AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O), visando garantir o fornecimento de alumínio na forma iônica de Al<sup>+3</sup> ( FURLANI; FURLANI, 1988).

As soluções de trabalho foram preparadas com um a dois dias de antecedência e foram mantidas sob refrigeração até o momento da instalação do experimento. Os sais, as formas químicas e as concentrações dos nutrientes utilizados no preparo das soluções estão indicados na (Tabela 1). O pH das soluções foram ajustados a  $4,01 \pm 0,01$  mediante adição de pequenas quantidades da solução de HCl  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Por se tratar de plantas de arroz que são adaptadas ao cultivo sob inundação, durante o período de execução do experimento foi dispensada a necessidade de oxigenação da solução nutritiva. A fase experimental teve duração de 30 dias.

**Tabela 1** – Composição das soluções estoque e nutritiva utilizadas na execução do experimento

Soluções Estoque			Solução nutritiva		
Nº.	Componentes	Concentração	Sol. Estoque (ml/L)	Nutrientes	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )
1	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	142,4	0,28	Ca	30,0
2	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	17,6	0,05	K	18,0
3	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	270	0,66	Mg	3,8
	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	33,8		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	32,0
4	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	24,9	0,33	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	4,0
	Na <sub>2</sub> EDTA	29,6		P	0,2
5	KCL	18,6	0,46	B	0,11
	KNO <sub>3</sub>	24,6		Fe	1,65
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	44,0		Mn	0,21
6	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2,34	0,33	Mo	0,03
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2,04		Zn	0,10
	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0,20		Cu	0,01
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1,41		Al	20,0
	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0,26			
7	AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	89,48	2,00		

Fonte: Autor.

Antes da instalação do ensaio, as sementes de arroz foram tratadas e desinfetadas superficialmente, mediante imersão por 30 minutos em solução de hipoclorito de sódio (2% v/v), e lavadas com água deionizada por igual período de tempo. Após esse tratamento, as sementes foram colocadas para germinar em

bandejas de plástico contendo o substrato, que depois foi irrigado adequadamente e coberto com toalhas de papel umedecidas para minimizar a evaporação da água e garantir a umidade do ambiente.

Depois da emergência, as plântulas foram mantidas nas bandejas em ambiente de casa de vegetação até os 10 dias de idade. Após esse período de crescimento, as plântulas foram cuidadosamente retiradas do substrato e o sistema radicular foi lavado em água destilada para a remoção de partículas de substrato. Posteriormente avaliou-se o comprimento máximo do sistema radicular utilizando uma régua graduada em milímetros. Na sequência foram selecionadas plântulas mais ou menos uniformes quanto ao comprimento da raiz seminal, para condução do teste de tolerância ao alumínio.

Usando pequenas tiras de espuma as plântulas selecionadas, com sistema radicular intacto, foram fixadas à altura da região do coleto, em orifícios circulares de placas de isopor que funcionaram como suporte. Estas placas com as plântulas fixadas foram colocadas para flutuar nos vasos contendo cerca de 2,0 litros de solução nutritiva correspondente aos tratamentos a serem testados. Dessa forma foi possível manter todo o sistema radicular imerso na solução teste. Durante a fase experimental que teve duração de 30 dias foram mantidas duas plântulas por vaso.

Para avaliar a tolerância diferencial das cultivares de arroz ao alumínio, as plantas de cada vaso foram colhidas e lavadas com água destilada. Após prévia secagem do excesso de água foram feitas as seguintes avaliações: altura da planta (AP), comprimento máximo da raiz seminal (CMRS) e área foliar (AF). Depois de separada a parte aérea das raízes os materiais foram encaminhados para secagem em estufa de circulação forçada de ar mantida à temperatura constante de 60 °C, por um período mínimo de 96 horas, para avaliação da produção de massa seca de raízes (MSR) e da massa seca da parte aérea (MSPA).

Com os dados obtidos nas avaliações anteriores foi possível calcular os valores da alongação radicular relativa (ERR) mediante emprego da seguinte equação, adaptada de Parker (1995):

$$ERR = [(CfAl_x - CiAl_x) / CfAl_0 - CiAl_0] \times 100,$$

onde:

**ERR:** alongação radicular relativa (%);

**CfAl<sub>x</sub>**: comprimento radicular máximo final (mm) após 30 dias de exposição ao nível X de Al.

**CiAl<sub>x</sub>**: comprimento radicular máximo inicial (mm) antes da exposição ao nível X de Al.

**CfAl<sub>0</sub>**: comprimento radicular máximo final (mm) após 30 dias de exposição ao nível 0,0 de Al (tratamento controle).

**CiAl<sub>0</sub>**: comprimento radicular máximo inicial (mm) antes da exposição ao nível 0,0 de Al (tratamento controle).

A alongação radicular foi expressa em base relativa (percentagem do controle) visando minimizar efeitos inerentes às características de crescimento diferenciado entre cultivares (REID; FLEMING; FOY, 1971) e, também, para compensar a dificuldade de obtenção de plântulas de comprimentos radiculares iguais, na fase de instalação do experimento (SARTAIN; KAMPRATH, 1978). Considerou-se como alongação radicular máxima a diferença entre o comprimento final e o inicial da raiz seminal no tratamento controle (sem Al). Com essa condição, a ERR para o tratamento controle assume o valor 100%.

Os valores absolutos de outras variáveis foram transformados em valores relativos como: massa seca relativa da parte aérea (MSRPA), massa seca relativa de raízes (MSRR), massa seca relativa total (MSRT) e alongação radicular relativa (ERR), tomando como referência o valor do tratamento controle. Segundo Jan e Pettersson (1989) a utilização dos valores relativos para discussão de resultados minimizam as diferenças inerentes às características intrínsecas das cultivares, bem como quanto às possíveis variações relacionadas às medidas de comprimento, massa seca produzida e área foliar.

## **Resultados e Discussão**

As cultivares de arroz expostas ao estresse de alumínio apresentaram, ao final do período experimental, raízes com comprimento máximo menor e ramificações laterais mais curtas em relação ao controle (sem Al). Entretanto, não foi observada a coloração escurecida típica de raízes severamente afetadas pelo Al. Todos os sintomas foram mais severos nas cultivares sensíveis e não foram observados sintomas visuais de toxidez na parte aérea das plantas.

### Comprimento Máximo da Raiz Seminal (CMRS)

O comprimento máximo da raiz seminal foi influenciado significativamente pelo alumínio da solução nutritiva independente do cultivar considerado (Tabela 2).

**Tabela 2** – Comprimento máximo da raiz seminal (mm) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
<b>IAPAR 9</b>	395 A <sup>(1)</sup>	273 A	219 A	221 A	198 A
<b>CNA-4164</b>	365 A	230 B	207 AB	146 B	156 B
<b>CNA-8521</b>	372 A	215 B	178 B	143 B	121 B
<b>Fedearroz-Lagunas</b>	387 A	107 C	80 C	71 C	73 C
<b>Fedearroz-174</b>	221 E	80 C	78 C	76 C	70 C
<b>Fedearroz-60</b>	328 BC	86 C	77 C	76 C	72 C
<b>Fedearroz-369</b>	275 D	84 C	73 C	82 C	75 C
<b>Fedearroz-50</b>	291 CD	86 C	80 C	75 C	75 C
<b>Fedearroz-Mocari</b>	300 CD	69 C	71 C	69 C	69 C
<b>CV(%): 11,28</b>			<b>DMS: 39,73</b>		

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Autor

Na ausência do Al<sup>+3</sup> os maiores valores de comprimento máximo da raiz seminal (395, 387, 372 e 365) foram verificados para os cultivares IAPAR-9, Fedearroz-Lagunas e as linhagens CNA-8521 e CNA-4164, respectivamente, que diferiram dos demais. No entanto, na presença de alumínio, todos os cultivares apresentaram reduções no comprimento máximo da raiz seminal. O cultivar IAPAR-9 foi superior aos demais, a exceção da concentração de 20 mg L<sup>-1</sup> de Al, quando não diferiu da linhagem CNA-4164. Estes resultados estão de acordo com Delhaize e Ryan (1995), Mendonça et al. (2005), que trabalhando com plantas de arroz na presença de Al, também observaram reduções do sistema radicular das plantas, independentemente dos cultivares considerados. Diferindo dos resultados deste estudo, vários autores verificaram efeitos favoráveis do alumínio no incremento do crescimento radicular de algumas espécies, com destaque para, goiabeira (SALVADOR et al., 2000), pimenta do reino (VELOSO et al., 2000) e arroz

(MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a, 1998b; VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB NETO, 2002; SILVA et al., 2011).

Deve-se destacar que na presença do Al todos os cultivares comerciais de origem colombiana apresentaram maiores reduções no crescimento máximo da raiz seminal do que aquelas que ocorreram com os cultivares ou linhagens de origem brasileira. Isso, de acordo com as observações de (RYAN; DITOMASO; KOCHIAN, 1993; PARKER, 1995), indica maior sensibilidade à toxidez causada pelo Al. Essa maior sensibilidade deve estar ligada às características genéticas destes cultivares (FURLANI; HANNA, 1984; FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988; FERREIRA et al., 1995; MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b).

As linhagens CNA-4164 (tolerante) e CNA-8521 (sensível), não apresentaram diferenças quanto ao crescimento máximo da raiz seminal (Tabela 2), diferindo dos resultados apresentados por Guimarães et al. (2006) que as classificaram como tolerante e sensível ao Al, respectivamente.

Quando se considera o efeito isolado das concentrações de Al, pode-se observar que para o cultivar IAPAR-9 e para as linhagens CNA-4164 e CNA-8521, as reduções no crescimento máximo da raiz seminal foram inferiores a 50, 58 e 68%, respectivamente (Tabela 3). Entretanto para os cultivares colombianos como Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-369, Fedearroz-50 e Fedearroz-Mocari, essas reduções foram superiores a 81, 68, 78, 73, 74 e 77%, respectivamente (Tabela 3). Estes resultados indicam que os cultivares de origem colombiana são mais sensíveis ao Al do que os cultivares de origem brasileira, exceto o cultivar Fedearroz-174 que apresentou redução de 68% igualando-se à linhagem CNA-8521.

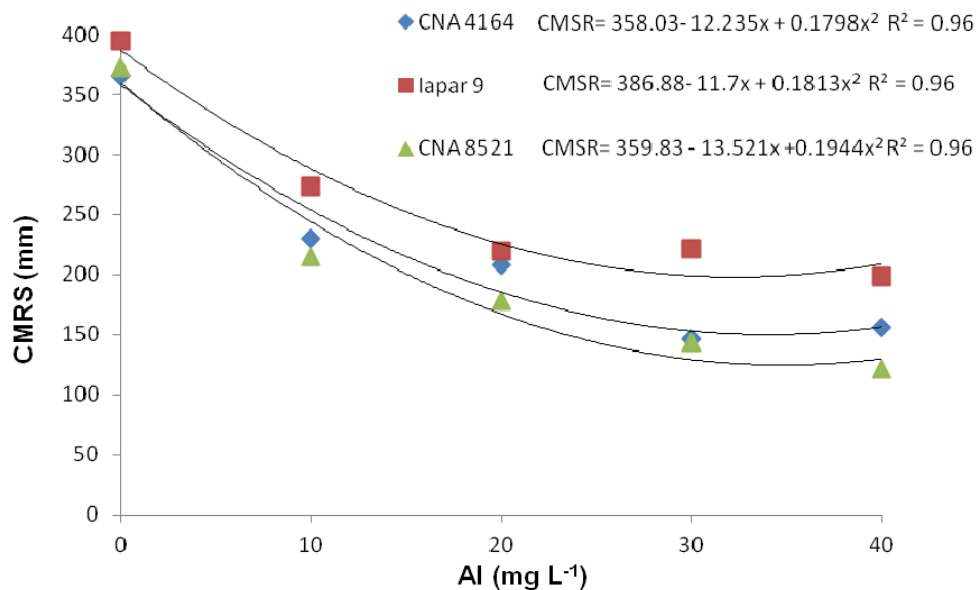
Os resultados obtidos neste estudo corroboram com outros trabalhos que demonstraram ocorrer reduções no comprimento radicular de plantas de arroz com o aumento dos níveis de alumínio na solução nutritiva (FREIRE et al., 1987; DELHAIZE; RYAN, 1995; MENDONÇA et al., 2005; SILVA et al., 2011).

**Tabela 3** – Redução do comprimento máximo da raiz seminal (%) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de Al em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0	31	45	44	50
CNA-4164	0	37	43	60	58
CNA-8521	0	42	52	62	68
Fedearroz-Lagunas	0	72	79	81	81
Fedearroz-174	0	64	65	66	68
Fedearroz-60	0	74	76	77	78
Fedearroz-369	0	69	73	70	73
Fedearroz-50	0	70	72	74	74
Fedearroz-Mocari	0	77	76	77	77

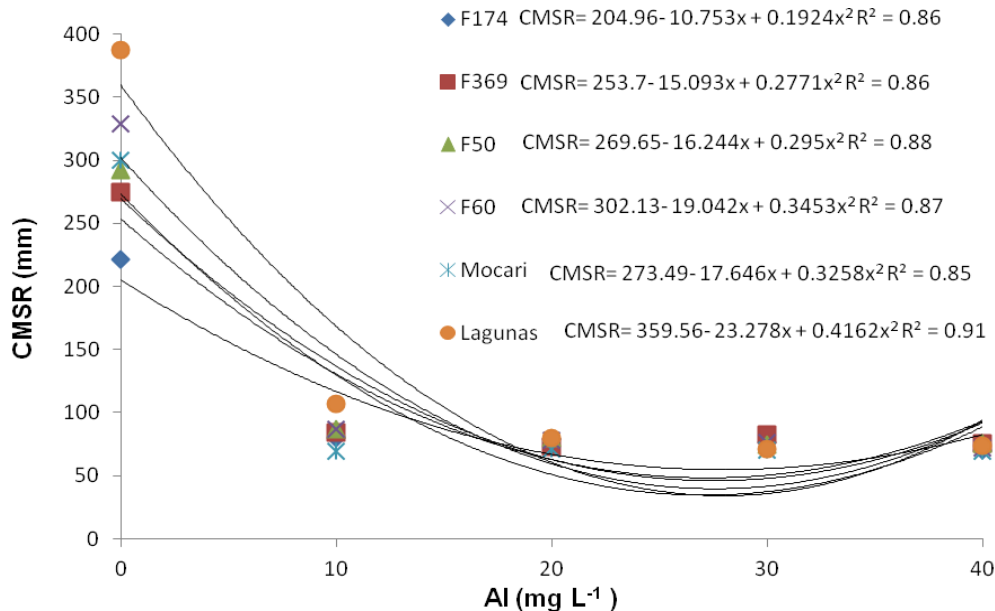
Fonte: Autor.

**Figura 2** – Variações do comprimento máximo da raiz seminal (CMRS) das plantas de arroz de cultivares de origem brasileira em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

**Figura 3** – Variações do comprimento máximo da raiz seminal (CMRS) das plantas de arroz de cultivares de origem colombiana em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

Para todos os cultivares testados as reduções no crescimento da raiz seminal se ajustaram ao modelo quadrático permitindo estimar as concentração de 34,7, 34,0 e 32 mg L<sup>-1</sup> de Al que determinaram os pontos de mínimo para os genótipos CNA-8521, CNA-4164, IAPAR-9, respectivamente (Figura 2). Para os cultivares colombianos os pontos mínimos variaram entre 27 e 28 mg L<sup>-1</sup> de Al (Figura 3)., indicando desta forma maior sensibilidade ao alumínio que os cultivares brasileiros. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por Mendonça et al. (2005), que obtiveram correlações negativas, entre o comprimento máximo radicular e a concentração de Al nas raízes de arroz, sendo que as reduções mais intensas ocorreram sempre nos cultivares mais sensíveis.

### Massa Seca de Raízes (MSR)

Na ausência do Al<sup>+3</sup> os maiores valores de massa seca radicular foram obtidos com as linhagens CNA-8521, CNA-4164 e o cultivar Fedearroz-Mocari (Tabela 4). Porém, na presença de Al, o cultivar IAPAR-9 foi superior as demais cultivares, exceto para as concentrações de 30 e 40 mg L<sup>-1</sup> de Al, quando não diferiu da cultivar CNA-4164 que é classificada como tolerante, comprovando assim a sua

tolerância ao Al.

**Tabela 4-** Massa seca radicular (g) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0,43 BC <sup>(1)</sup>	0,46 A	0,44 A	0,35 A	0,35 A
CNA-4164	0,49 A	0,35 BC	0,38 B	0,39 A	0,35 A
CNA-8521	0,49 A	0,39 B	0,32 C	0,28 B	0,26 B
Fedearroz-Lagunas	0,38 CD	0,24 D	0,24 DE	0,24 C	0,16 C
Fedearroz-174	0,30 D	0,18 E	0,17 G	0,15 E	0,14 C
Fedearroz-60	0,39 CD	0,23 DE	0,22 DEF	0,19 CDE	0,16 C
Fedearroz-369	0,29 D	0,18 E	0,18 FG	0,17 DE	0,17 C
Fedearroz-50	0,38 CD	0,23 D	0,21 EFG	0,18 DE	0,18 C
Fedearroz-Mocari	0,48 AB	0,32 C	0,27 D	0,21 CD	0,16 C
	CV(%): 8,11		DMS: 0,051		

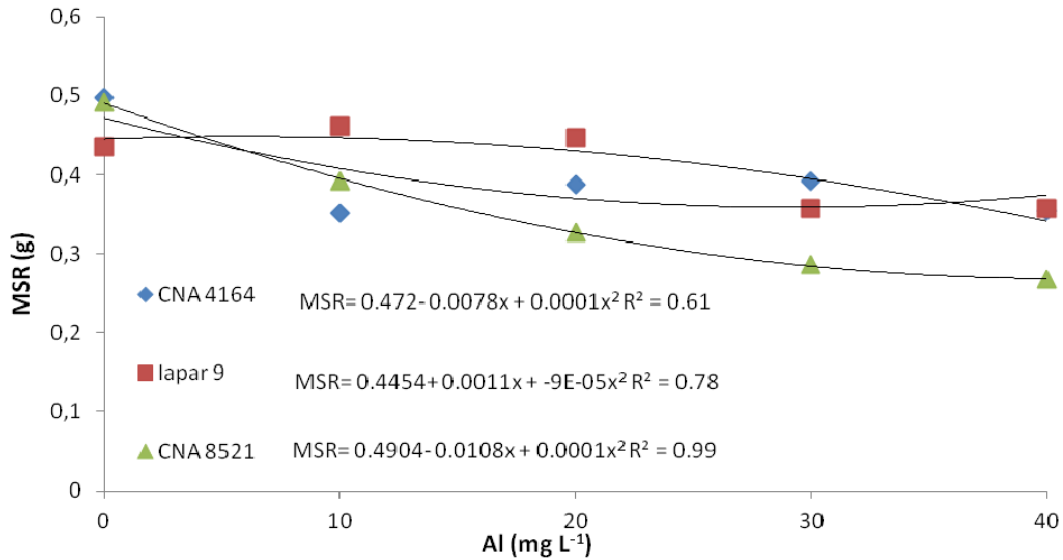
<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Autor.

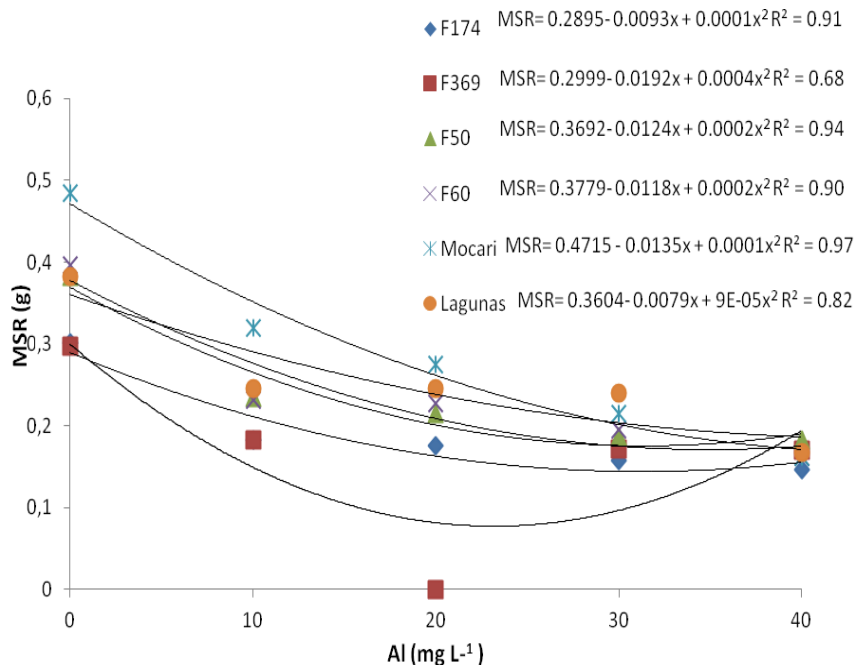
Independentemente da concentração de Al na solução nutritiva, os menores valores para produção de massa seca radicular foram registrados nos cultivares de origem colombiana (cultivares 4 a 9, Tabela 3). Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por Mendonça et al. (2005), Guimarães et al. (2006) e Silva et al. (2011), que trabalhando com cultivares de arroz verificaram reduções na produção de matéria seca de raízes em função do incremento dos teores de alumínio na solução nutritiva.

A massa seca radicular decresceu com o aumento das concentrações de Al ajustando-se a um modelo quadrático (Figuras 4 e 5), exceto para o cultivar IAPAR-9, que apresentou incremento na massa seca de raízes obtendo produção máxima com a concentração de 11 mg Al L<sup>-1</sup> (Figura 4), mostrando ser mais tolerante que os demais cultivares. Estes dados corroboram-se com os resultados obtidos por Macedo, Kinet e Van Sint (1997), Vicente, Rossiello e Pereira (1998a), Veloso et al. (2000), Vasconcelos, Rossiello e Jacobo Neto (2002), Carvalho et al. (2003) e Silva et al. (2011).

**Figura 4** – Produção de massa seca radicular (MSR) de plantas de arroz de cultivares de origem brasileiro em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



**Figura 5** – Produção de massa seca radicular (MSR) de plantas de arroz de cultivares de origem colombiana em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Os genótipos colombianos apresentaram reduções na produção de massa seca radicular superior a 53% (Tabela 5) na concentração de 40 mg Al L<sup>-1</sup>, sendo que o cultivar Fedearroz-Mocari foi a mais influenciada apresentando a maior

diminuição para essa variável. Entre os genótipos brasileiros, as linhagens CNA-4164 (tolerante) e CNA-8521 (suscetível ao Al) reduziram a produção de 29% e 47% na MSR, respectivamente (Tabela 5). De acordo com Mendonça et al. (2005), cultivares de arroz mais sensíveis podem apresentar reduções de até 57%, na produção de matéria seca das raízes. Para Guimarães et al. (2006), dados sobre avaliação do crescimento e do acúmulo de matéria seca do sistema radicular de são suficientes para classificar cultivares de arroz quanto a tolerância ao Al.

**Tabela 5** – Redução da massa seca radicular (%) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0	0	0	19	19
CNA-4164	0	29	23	21	29
CNA-8521	0	21	35	43	47
Fedearroz-Lagunas	0	37	37	37	58
Fedearroz-174	0	40	43	50	53
Fedearroz-60	0	41	44	51	59
Fedearroz-369	0	62	62	58	58
Fedearroz-50	0	40	45	53	53
Fedearroz-Mocari	0	33	44	56	67

Fonte: Autor.

### Massa Seca Relativa de Raízes (MSRR)

A adição de Al à solução nutritiva reduziu a MSRR para todos os cultivares estudados, a exceção do cultivar IAPAR-9, que nas concentrações 10 e 20 mg de Al L<sup>-1</sup> apresentou maior valor de MSRR que o controle. Por outro lado, as reduções foram observadas de forma mais intensas no cultivar Fedearroz-Mocari (Tabela 6).

Na maior concentração de alumínio testada (40 mg L<sup>-1</sup> de Al) o cultivar IAPAR-9 e a linhagem CNA-4164 (tolerante) apresentaram maiores valores de MSRR, indicando maior tolerância que os demais genótipos testados.

**Tabela 6** – Massa seca relativa de raiz (%) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio na solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
<b>IAPAR 9</b>	100 A <sup>(1)</sup>	105 A	102 A	81 A	81 A
<b>CNA-4164</b>	100 A	71 BC	77 B	78 B	71 A
<b>CNA-8521</b>	100 A	79 B	66 C	58 B	54 BC
<b>Fedearroz-Lagunas</b>	100 A	64 CD	64 C	62 B	43 CDE
<b>Fedearroz-174</b>	100 A	59 D	58 C	51 BCD	48 BCD
<b>Fedearroz-60</b>	100 A	58 D	57 C	48 CD	40 D
<b>Fedearroz-369</b>	100 A	63 CD	62 C	58 BC	58 B
<b>Fedearroz-50</b>	100 A	59 D	55 C	48 CD	46 CD
<b>Fedearroz-Mocari</b>	100 A	66 C	57 C	44 D	33 E
<b>CV(%): 6,78</b>			<b>DMS: 10,54</b>		

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Autor.

Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por Vasconcelos, Rossiello e Jacobo Neto (2002) onde cultivares de arroz tolerantes e sensíveis ao alumínio foram diferenciados pela MSRR. Para Santos (1991) e Macedo, Kinet e Van Sint (1997) a MSRR é adequada para a distinção de tolerância entre cultivares de arroz em experimentos de longa duração, mas de acordo com Vicente, Rossiello e Pereira (1998a) apresenta sensibilidade intermediária para avaliação de experimentos de três a quatro semanas, como no presente estudo.

Para as cultivares de arroz de origem colombiana a concentração de 40 mg L<sup>-1</sup> de Al na solução nutritiva, promoveu reduções da MSRR superiores a 52%, com exceção do cultivar Fedearroz-369 que apresentou redução de 42% (Tabela 7). Com esses resultados pode-se classificar os cultivares colombianos como sensíveis ao Al, de acordo com a metodologia de classificação utilizada Macedo, Kinet e Van Sint (1997) que observaram que concentrações de Al na solução nutritiva da ordem de 27,0 a 40,5 mg L<sup>-1</sup> de Al é suficiente para distinguir entre cultivares sensíveis e tolerantes, uma vez que os sensíveis apresentam sempre menores produções de massa seca radicular.

**Tabela 7** – Redução da massa seca relativa de raiz (%) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio na solução nutritiva.

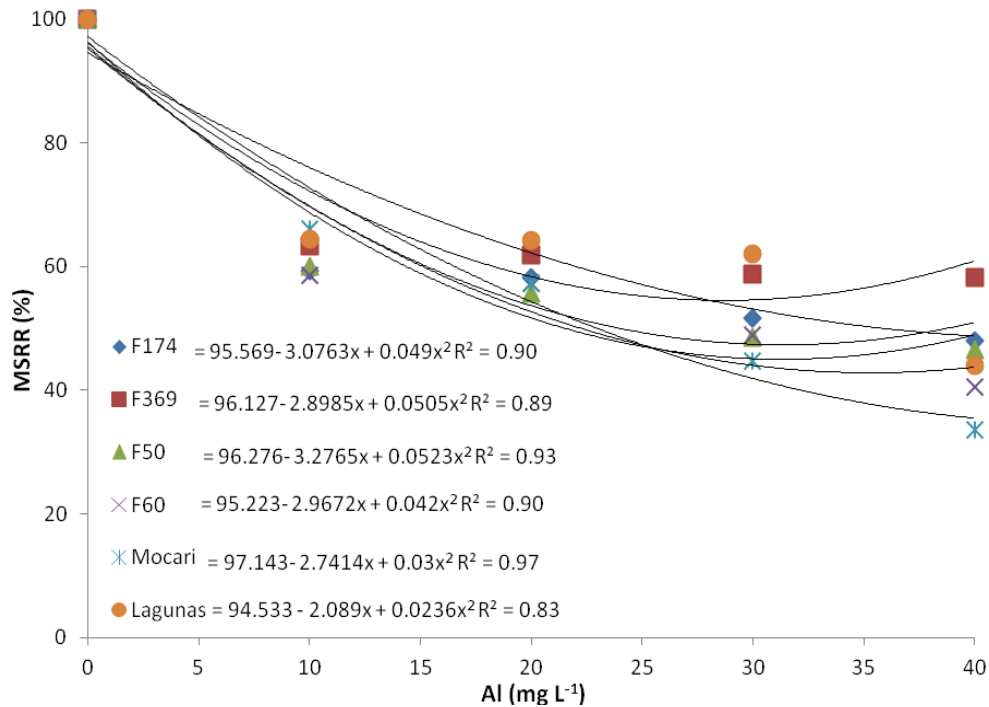
CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0	0	0	19	19
CNA-4164	0	29	23	22	29
CNA-8521	0	21	34	42	46
Fedearroz-Lagunas	0	36	36	38	57
Fedearroz-174	0	41	42	49	52
Fedearroz-60	0	42	43	52	60
Fedearroz-369	0	37	38	42	42
Fedearroz-50	0	41	45	52	54
Fedearroz-Mocari	0	34	43	56	67

Fonte: Autor.

Considerando de forma isolada os efeitos das concentrações de Al foi possível observar que houve redução progressiva dos valores de MSRR para todos os genótipos avaliados. Essas reduções se ajustaram significativamente a funções polinomiais de segunda ordem, independentemente do cultivar considerado (Figuras 6 e 7), concordando com o que foi observado por Fageria, Wright e Baligar (1988), Vicente, Rossiello e Pereira (1998a) e Vasconcelos, Rossiello e Jacobe Neto (2002).

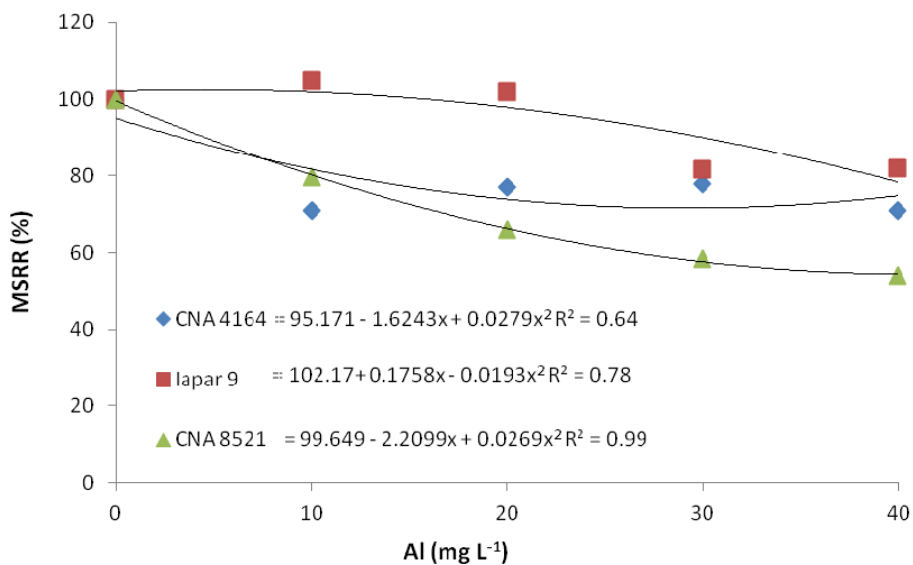
A linhagem CNA-4164 (tolerante) apresentou redução de 29% na MSRR, enquanto para a CNA-8521 (sensível) a diminuição foi de 46% (Tabela 7). O cultivar IAPAR-9 apresentou uma redução da MSRR inferior a 20% e o ponto de máximo foi estimado para a concentração de 4,5 mg L<sup>-1</sup> de Al (Tabela 7 e Figura 7). Nesta situação, pode-se considerar que a variável MSRR apresenta sensibilidade adequada para se distinguir entre cultivares de arroz sensíveis e tolerantes ao Al, corroborando com as observações apresentadas por Vasconcelos, Rossiello e Jacobe Neto (2002). Esses autores classificaram os cultivares de arroz em tolerantes e sensíveis ao Al, considerando as reduções diferenciais na MSRR.

**Figura 6** – Variação dos valores da massa seca relativa de raiz (MSRR) de plântulas de arroz de cultivares de origem colombiano em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

**Figura 7** – Variação dos valores da massa seca relativa de raiz (MSRR) de plantas de arroz de cultivares de origem brasileiro em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

### Massa Seca Relativa de Parte Aérea (MSRPA)

Após trinta dias de exposição das plantas a uma solução com diferentes concentrações de Al foi possível estabelecer comportamentos distintos entre os cultivares quanto aos valores de MSRPA, que foram influenciados significativamente pela interação cultivar x concentração de Al (Tabela 8).

**Tabela 8** – Massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	100 A <sup>(1)</sup>	107,2 A	102,2 A	78,7 AB	76,5 AB
CNA-4164	100 A	109 A	89,9 AB	84,4 A	76,5 AB
CNA-8521	100 A	87,2 B	86,2B	84,9 A	77,8 A
Fedearroz-Lagunas	100 A	76,5 B	74,9 CD	77,2 AB	64,9 ABC
Fedearroz-174	100 A	84,1 B	68,8 D	59,4 C	54,1 C
Fedearroz-60	100 A	84,4 B	75,6 CD	77,3AB	63,4 BC
Fedearroz-369	100 A	81,4 B	77,7 BCD	69,7 BC	63,5 BC
Fedearroz-50	100 A	81,9 B	65,1D	72,7 ABC	61,8 C
Fedearroz-Mocari	100 A	82,9 B	74,9 CD	66,9 BC	55,6 C
CV(%): 7,76			DMS: 14,12		

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Autor.

O cultivar IAPAR-9 e a linhagem CNA-4164 (tolerante) apresentaram ganhos de 7 e 9% da MSRPA na presença 10 mg L<sup>-1</sup> de Al, indicando um certo estímulo ao crescimento da planta determinado pelo alumínio na solução. Este resultado esta de acordo com Foy (1983) e Sivaguru e Paliwal (1993), que já identificaram que pequenas quantidades de alumínio no substrato podem favorecer o crescimento de algumas plantas. Recentemente, Baluska et al. (2003) indicou que o benefício das pequenas quantidade de alumínio se deve ao efeito deste elemento ao reduzirem a eletronegatividade da superfície celular, amenizando os efeitos lesivos do excesso de prótons sobre as aéreas sensíveis, localizadas no *continuum* formado pela parede celular, membrana plasmática, e citoesqueleto cortical das células do ápice radicular.

Os resultados obtidos corroboram aqueles apresentados por Silva (1992) e Silva et al. (2011), que também constaram efeito positivo do Al no aumento

da matéria seca da parte aérea e total em plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva. Os resultados obtidos também são semelhantes àqueles apresentados por Macedo, Kinet e Van Sint (1997) e Vicente, Rossiello e Pereira (1998).

Para a maior concentração de Al testado, o cultivar IAPAR-9 não diferiu das linhagens CNA-4164 (tolerante) e CNA-8521 (sensível) e do cultivar Fedearroz-Lagunas, caracterizando a menor sensibilidade desse parâmetro para a distinção dos cultivares quanto à tolerância ao alumínio. De acordo com Jan e Pettersson (1995) e Vasconcelos, Rossiello, Jacobo Neto (2002) a massa seca da parte aérea é comumente menos afetada pelo Al do meio de cultivo do que parâmetros relativos ao sistema radicular.

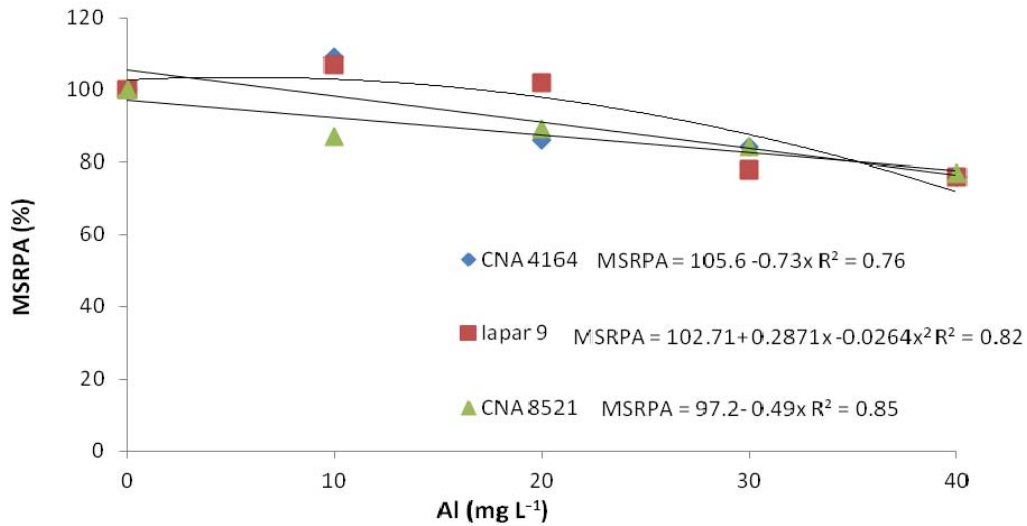
Na presença do Al, o cultivar IAPAR-9 e as linhagens CNA-8521 (sensível) e CNA-4164 (tolerante), apresentaram reduções da MSRPA inferior a 23,5% (Tabela 9) com taxas de decréscimos de 0,49% e 0,73% para cada 1,0 mg L<sup>-1</sup> de Al acrescentado a solução nutritiva (Figura 8). Os baixos valores das taxas de decréscimo expressam a maior tolerância destes cultivares ao Al. Por outro lado, os cultivares colombianos apresentaram reduções mais intensas da MSRPA, atingindo valores superiores a 36,5%, indicando maior sensibilidade ao Al, exceto para o cultivar Fedearroz-Lagunas que apresentou redução inferior a 35% (Tabela 9).

**Tabela 9** – Redução da massa seca relativa da parte aérea (%) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0	0	0	21	23
CNA-4164	0	0	10	16	23
CNA-8521	0	13	14	15	22
Fedearroz-Lagunas	0	23	25	23	35
Fedearroz-174	0	16	31	41	46
Fedearroz-60	0	16	24	23	37
Fedearroz-369	0	19	22	30	37
Fedearroz-50	0	18	35	27	38
Fedearroz-Mocari	0	17	25	33	45

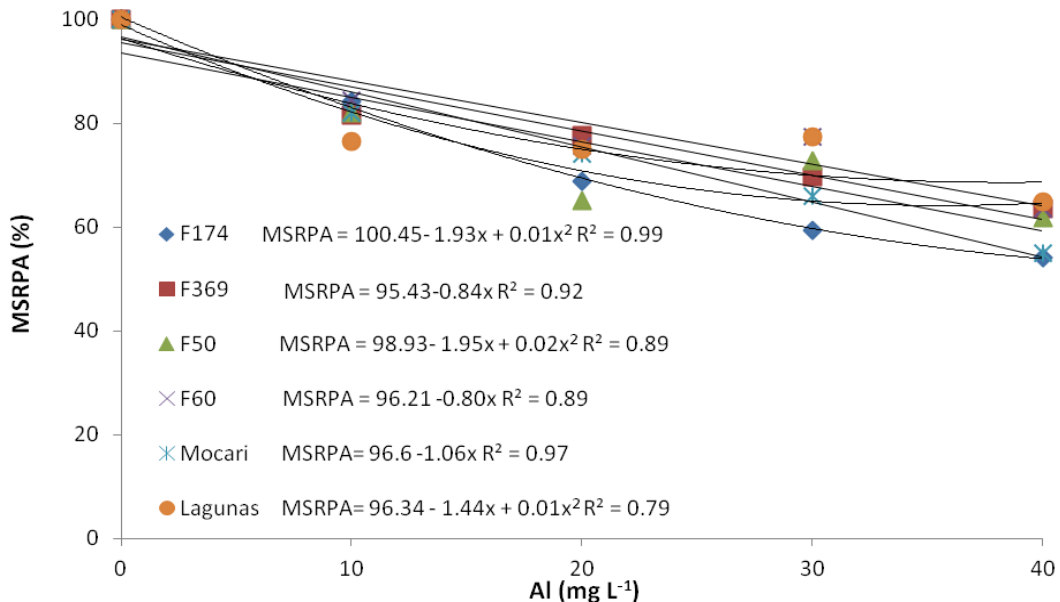
Fonte: Autor.

**Figura 8** – Variação dos valores da massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) de plantas de arroz de cultivares brasileiros, em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

**Figura 9** – Variação dos valores da massa seca relativa da parte aérea (MSRPA) de plantas de arroz de cultivares colombianos em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

### Massa Seca Relativa Total (MSRT)

A interação entre alumínio e cultivar afetou significativamente ( $p \leq 0,05$ ) a massa seca relativa total (MSRT). Para concentrações de 10 e 20 mg L<sup>-1</sup> de Al o cultivar IAPAR-9 apresentou valores de MSRT superiores a 100% (Tabela 10), indicando o efeito favorável do Al quando presente no substrato em pequenas quantidades. Respostas semelhantes foram descritas por Howeler e Cadavid (1976), Fageria (1982) e Rossiello et al. (1995). 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; PALIWAL, 1993; MACEDO, KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a).

**Tabela 10** – Massa seca relativa total (MSRT) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	100 A <sup>(1)</sup>	106 A	102 A	79 A	78 A
CNA-4164	100 A	93 B	82 B	82 A	79 A
CNA-8521	100 A	84 ABC	80 BC	74 AB	68 AB
Fedearroz-Lagunas	100 A	72 D	70 CD	71 AB	57 CD
Fedearroz-174	100 A	73 CD	64 D	56 C	51 CD
Fedearroz-60	100 A	74 CD	68 CD	65 BC	54 CD
Fedearroz-369	100 A	73 CD	71 CD	65 BC	61 BC
Fedearroz-50	100 A	73 CD	61 D	63 BC	56 CD
Fedearroz-Mocari	100 A	75 CD	67 D	57 C	46 D
	CV(%): 6,83		DMS: 11,02		

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

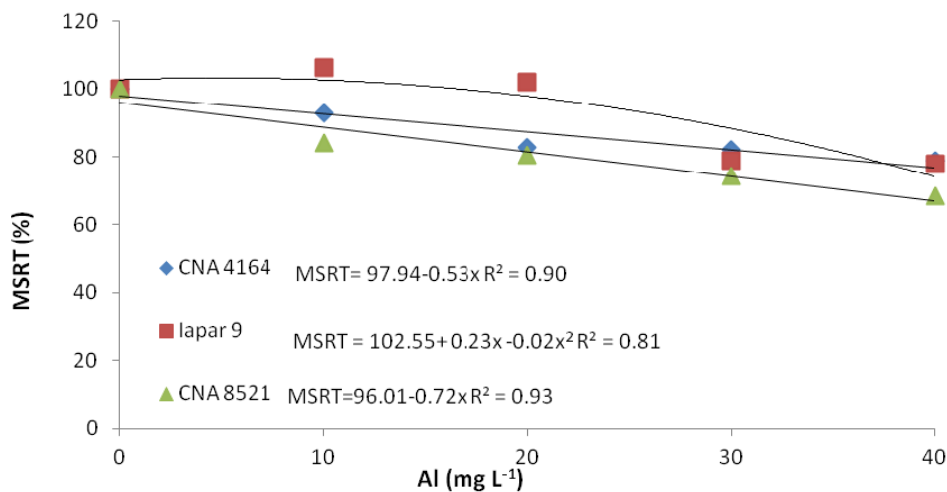
Fonte: Autor.

Na última concentração de alumínio avaliado, o cultivar IAPAR 9 não diferiu das linhagens CNA-4164 e CNA-8521 e esta última do cultivar Fedearroz-369, indicando maior tolerância que os demais genótipos testados, os cultivares de arroz colombianos com exceção deste último, apresentaram MSRT significativamente inferior, classificando-os como sensíveis ao Al. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por Santos (1991) onde cultivares de arroz tolerantes e sensíveis ao alumínio foram diferenciados pela massa seca total, entanto, esse mesmo autor sugeriu a porcentagem de redução relativa da massa seca total como

a variável mais adequado na seleção de cultivares de arroz tolerantes ao Al, por integrar todos os efeitos ambientais que influenciam a expressão da tolerância.

Avaliando os efeitos das concentrações de Al foi possível observar que as reduções na MSRT se ajustaram a modelos lineares decrescentes para as duas linhagens testadas e ao modelo quadrático o cultivar IAPAR-9 (Figura 10), permitindo estimar o ponto de máximo para a concentração 5,0 mg L<sup>-1</sup> de Al na solução.

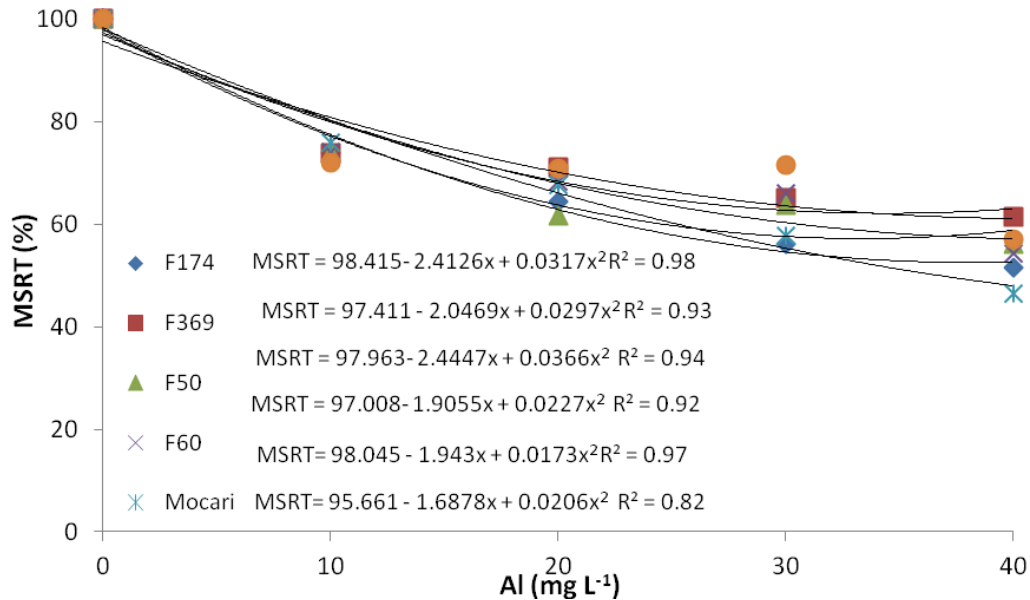
**Figura 10** – Variação dos valores da massa seca relativa total (MSRT) de plantas de arroz de cultivares brasileiros em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

Reduções na MSRT foram observadas nas linhagens CNA-4164 e CNA-8521 com um valor inferior a 32% na concentração de 40 mg L<sup>-1</sup> de Al (Tabela 11), com taxas de decréscimos de 0,53% e 0,72% para cada 1,0 mg L<sup>-1</sup> de Al acrescido a solução nutritiva (Figura 10). Os cultivares colombianos sofreram reduções superiores a 53% com exceção do cultivar Fedearroz-369 que foi inferior a 39% (Tabela 11). Mendonça et al. (2005) obtiveram resultados semelhantes com plantas de arroz e classificaram materiais que sofreram reduções que variaram de 16% a 57%, sendo os maiores valores de massa seca total para cultivares sensíveis e os menores para tolerantes ao Al. Entretanto, tais resultados discordam do estudo de Vasconcelos, Rossiello e Jacobo Neto (2002), no qual cultivares de arroz não foram classificados de acordo com a MSRT.

**Figura 11** – Variação dos valores da massa seca relativa total (MSRT) de plântulas de arroz de cultivares colombianos em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

**Tabela 11** – Redução da massa seca relativa total (MSRT) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al (mg L <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
IAPAR 9	0	0	0	21	22
CNA-4164	0	7	18	18	21
CNA-8521	0	16	20	26	32
Fedearroz-Lagunas	0	28	30	29	43
Fedearroz-174	0	27	36	44	49
Fedearroz-60	0	26	32	35	46
Fedearroz-369	0	27	29	35	39
Fedearroz-50	0	27	39	37	44
Fedearroz-Mocari	0	25	33	43	54

Fonte: Autor.

## Alongamento Radicular Relativa (ERR)

A alongamento radicular relativa (ERR) foi significativamente ( $p \leq 0,05$ ) afetada pela interação entre cultivares e concentração de Al na solução nutritiva (Tabela 12).

**Tabela 12** – Alongamento radicular relativa (ERR) das cultivares de arroz submetidas a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva.

CULTIVARES	Al ( $\text{mg L}^{-1}$ )				
	0	10	20	30	40
<b>IAPAR 9</b>	100 A <sup>(1)</sup>	63,0 A	46,6 A	48,4 A	41,5 A
<b>CNA-4164</b>	100 A	52,9 B	47,3 A	22,9 B	30,3 B
<b>CNA-8521</b>	100 A	47,7 B	36,8 B	23 B	17,4 C
<b>Fedearroz-Lagunas</b>	100 A	12,7 C	2,7 C	1,4 C	1,5 D
<b>Fedearroz-174</b>	100 A	7,4 D	3,2 C	4,0 C	4,1 D
<b>Fedearroz-60</b>	100 A	5,0 D	2,9 C	2,1 C	1,2 D
<b>Fedearroz-369</b>	100 A	7,5 D	4,5 C	4,5 C	2,4 D
<b>Fedearroz-50</b>	100 A	6,8 D	3,4 C	2,5 C	2,5 D
<b>Fedearroz-Mocari</b>	100 A	2,9 D	3,4 C	3,0 C	3,3 D
	<b>CV(%): 9,11</b>			<b>DMS: 6,32</b>	

<sup>(1)</sup> Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Autor.

O aumento da concentração de Al na solução nutritiva reduziu a ERR para todas cultivares testados, embora esse efeito tenha sido mais drástico nos cultivares de origem colombianas (Fedearroz-50, Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-Lagunas, Fedearroz-369 e Fedearroz-Mocari, se mostraram mais sensíveis à toxidez causada pelo alumínio (Tabela 10), como normalmente ocorrem trabalhos executados para testar os efeitos da toxicidade de Al em cultivares contrastantes quanto a tolerância a este elemento (Reid; FLEMING; FOY, 1971; Zhang; Taylor, 1988; Ganesan; SANKARANARAYANAN; BALAKUMAR, 1993; Pintro; BARLOY; FALLAVIER, 1996). Com base na ERR, Vasconcelos, Rossielloe Jacobo Neto (2002) trabalhando com solução contendo apenas  $\text{CaCl}_2$  ou com baixos níveis de  $\text{AlCl}_3$  (0,27-0,54  $\text{mg L}^{-1}$ ) constatou, entre cultivares de arroz, diferenças ainda maiores que as observadas neste estudo.

A redução do comprimento radicular é uma observação comum em plantas de arroz (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979) e de outras espécies (KINRAIDE

RYAN; KOCHIAN, 1992) quando submetidas ao estresse de Al. Entretanto, o cultivar IAPAR-9 apresentou sempre ERR significativamente superior a todos os outros materiais testados, comprovando a sua maior tolerância ao Al.

Apesar de ainda não se ter uma classificação para o cultivar IAPAR-9 quanto aos efeitos do Al, os resultados obtidos permitem classificá-lo como moderadamente tolerante, uma vez que apresentou valor médio ERR de 47,5% quando cultivado em solução com Al, e segundo Vasconcelos, Rossiello e Jacobe Neto (2002) são considerados tolerantes os cultivares que nesta condição apresenta valores de ERR > que 50%.

Entre os cultivares colombianos, o maior valor de ERR foi obtido para o cultivar Fedearroz-Lagunas, quando a solução nutritiva continha apenas 10 mg L<sup>-1</sup> de Al. Estes resultados estão de acordo com o que foi observado pelos autores Vasconcelos, Rossiello e Jacobe Neto (2002) e Guimarães et al. (2006), e indicam que todas elas são consideradas sensíveis à toxidez de Al.

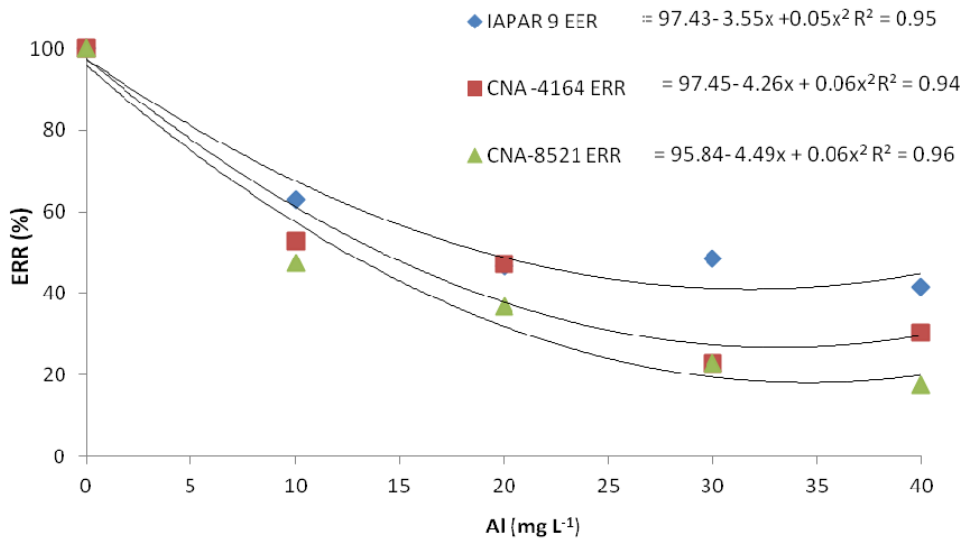
Avaliando o efeito direto das concentração de Al foi possível observar que houve redução progressiva dos valores de ERR para todas as cultivares avaliadas (Figuras 12 e 13).

Para o cultivar IAPAR-9 as reduções observadas nos valores de ERR se ajustaram a uma função polinomial de segundo grau (Figura 12) permitindo estimar que 18 mg L<sup>-1</sup> de Al na solução nutritiva foi a concentração que determinou redução de 50% da ERR em relação ao controle. Para os outros genótipos de origem brasileira estes valores foram de 14,12 e 6,71 mg L<sup>-1</sup> de Al, para as linhagens CNA-4164 e CNA-8521, respectivamente. Estes valores indicam variações diferenciais entre as cultivares e estão de acordo com (VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB NETO, 2002). O valor da concentração de Al na solução nutritiva que determina a redução de 50% na ERR é utilizada por diferentes pesquisadores (REID; FLEMING; FOY, 1971; ZHANG; TAYLOR, 1988; GANESAN; SANKARANARAYANAN; BALAKUMAR, 1993; PINTRO; BARLOY; FALLAVIER, 1996) para diferenciar e classificar os cultivares arroz quanto a tolerancia aos efeitos tóxicos do Al.

Níveis acima a 10 mg L<sup>-1</sup> de Al, foram suficientes para que os valores médios de ERR dos cultivares de origem colombiana (Fedearroz-174, Fedearroz-60, Fedearroz-369, Fedearroz-50 e Fedearroz-Mocari) apresentassem valores de ERR inferiores a 10%, a exceção do cultivar Fedearroz-Lagunas que

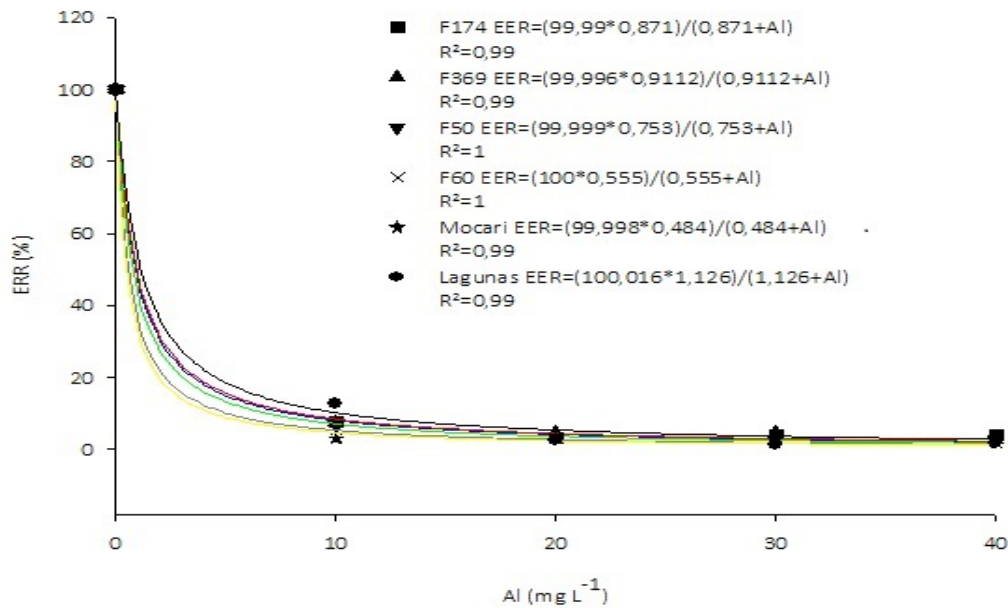
apresentou ERR de 13% (Tabela 10, Figura 13).

**Figura 12** – Variações dos valores da elongação radicular relativa (ERR) das plantas de arroz de cultivares de origem brasileiro em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

**Figura 13** – Variações dos valores da elongação radicular relativa (ERR) das plantas de arroz de cultivares de origem colombiano em função das concentrações de alumínio da solução nutritiva.



Fonte: Autor.

Quando se considera os efeitos das concentrações de Al, pode-se

observar entre os cultivares de origem colombiana que, as reduções da ERR se ajustaram ao modelo quadrádico permitindo estimar doses que variaram de 5,87 a 6,41 mg L<sup>-1</sup> de Al, suficientes para reduzir os valores de ERR a 50% do valor observado no controle. Isso pode ser entendido como uma completa estagnação da alongação radicular das plântulas destes cultivares, confirmando, de acordo com os critérios adotados pelos pesquisadores (FREIRE et al., 1987; DELHAIZE; RYAN, 1995) que se trata de materiais ou genótipos sensíveis ao alumínio.

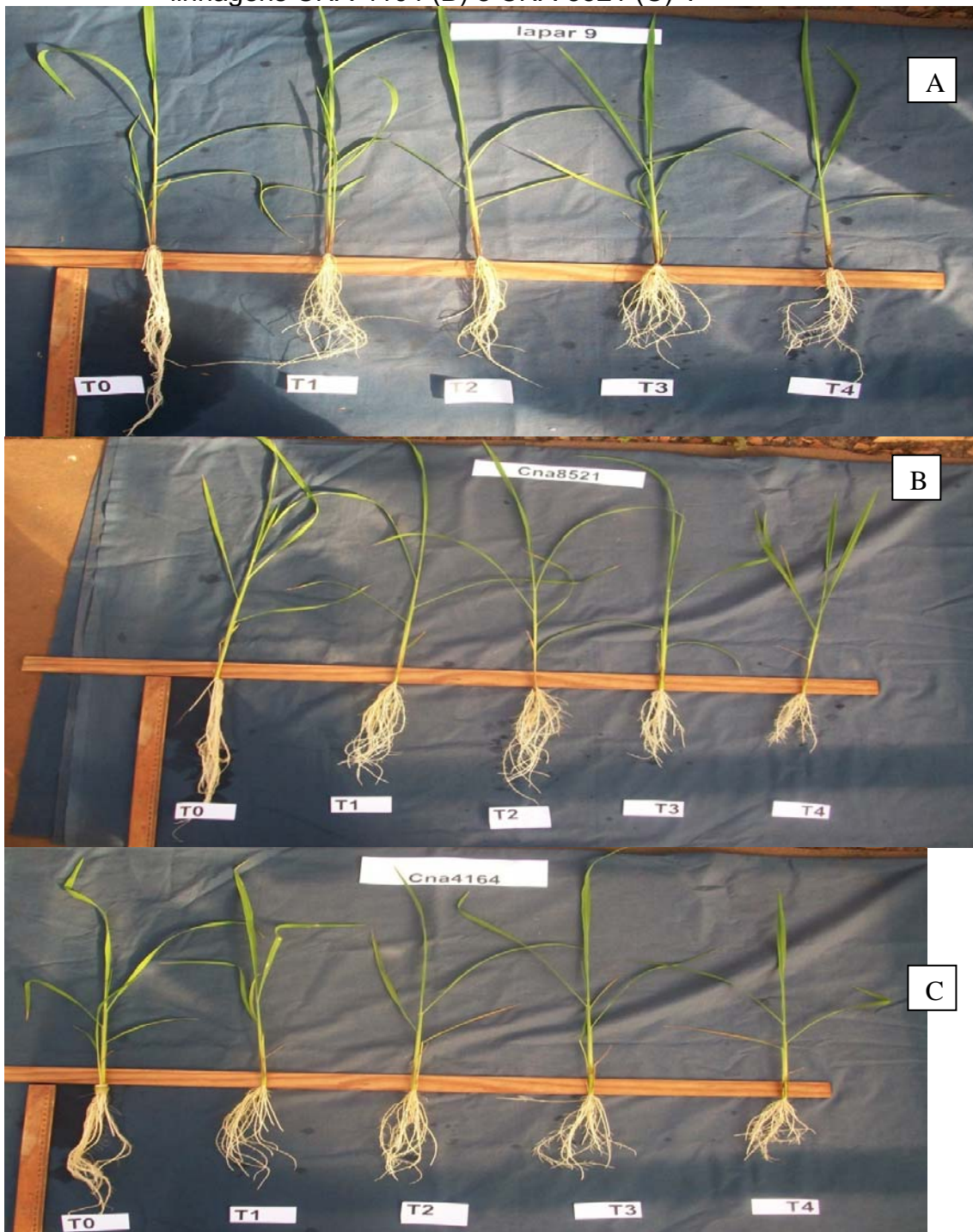
Visualmente pode-se observar na (Figura 14) que na presença de Al, as raízes do cultivar IAPAR-9, e das linhagens CNA-4164 e CNA-8521 apresentam-se curtas e com ramificações laterais bastante atrofiadas. Esse efeito foi mais pronunciado nos cultivares colombianos que são sensíveis ao Al (Figura 15).

De modo geral, os sintomas observados estão de acordo com aqueles relatados na literatura, exceto o escurecimento das raízes, como descreve os autores Foy (1983) e Ahlrichs et al. (1991) e Santos (1991) que trabalhou especificamente com plantas de arroz de 40 dias foram mantidas por 26 dias em solução nutritiva contendo 10 mg L<sup>-1</sup> de Al.

Os resultados visuais observados neste estudo difere de Santos (1991) que considera o escurecimento das raízes como uma característica da toxidez do alumínio.

Para Fahl, Carelli e Deuber (1982), Horst e Klotz (1990) e Vasconcelos, Rossiello e Jacobo Neto (2002), a ERR por ser uma variável estável, pode ser utilizada para identificação de cultivares de diversas espécies vegetais quanto a tolerância ao Al e considerando os valores de ERR obtidos neste estudo pode-se agrupar os genótipos avaliados da seguinte forma: grupo I (IAPAR-9 e CNA-4164, como tolerantes ao Al) e grupo II (CNA-8521, Fedearroz-174, Fedearroz-Mocari, Fedearroz-50, Fedearroz-369, Fedearroz-60 e Fedearroz-Lagunas, como sensíveis).

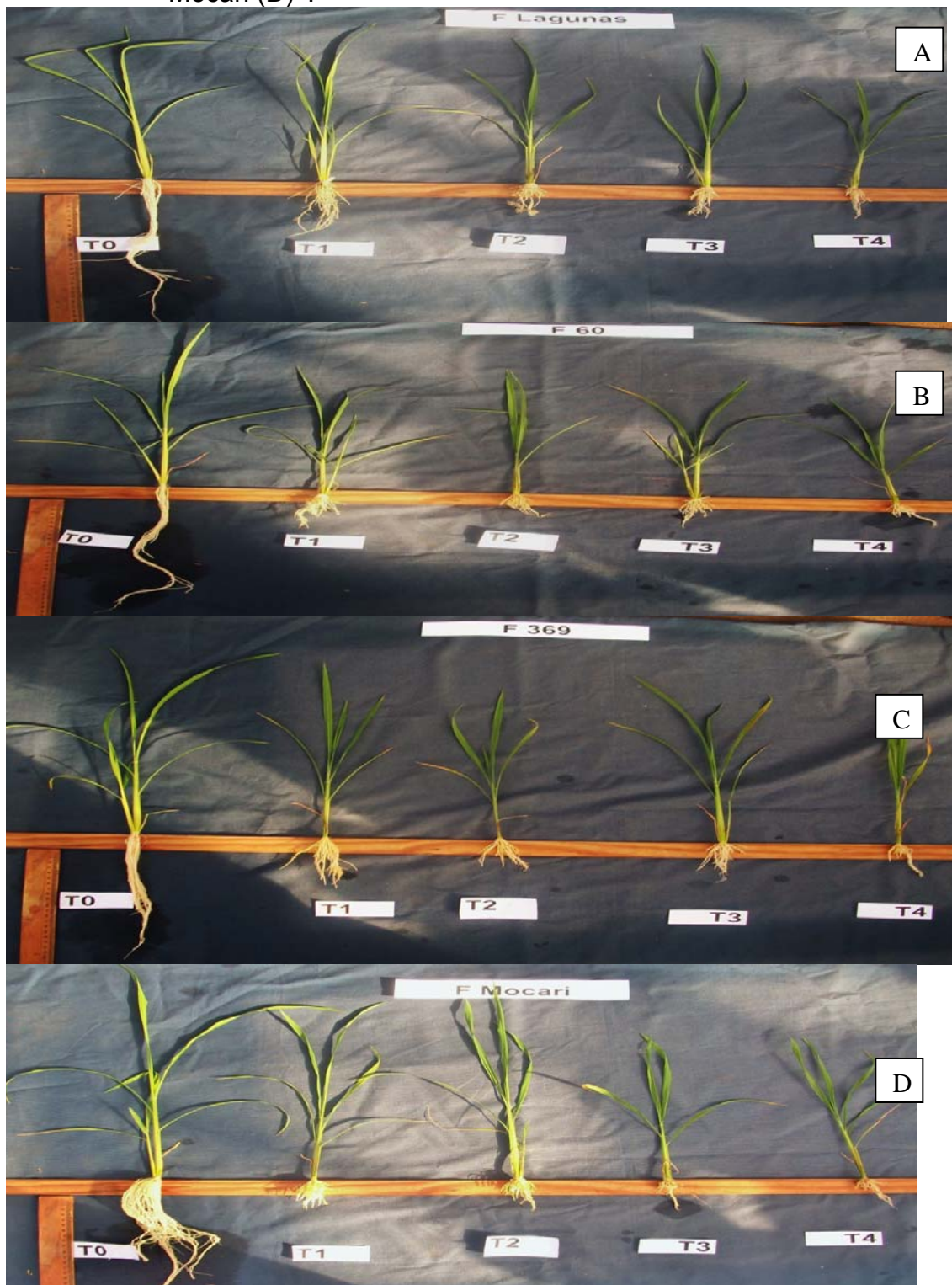
**Figura 14** – Aspecto visual do sistema radicular da cultivar IAPAR-9 (A) e das linhagens CNA-4164 (B) e CNA-8521 (C)\*.



\*submetidas a cinco concentrações de Al em solução nutritiva. T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> e T<sub>4</sub> = 0, 10, 20, 30 e 40 mgL<sup>-1</sup> de Al, respectivamente.

Fonte: Autor.

**Figura 14** – Aspecto visual do sistema radicular das cultivares Fedearroz-Lagunas (A), Fedearroz-60 (B), Fedearroz-369 (C) e Fedearroz-Mocari (D)\*.



\*submetidas a cinco concentrações de Al em solução nutritiva. T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> e T<sub>4</sub> = 0, 10, 20, 30 e 40 mgL<sup>-1</sup> de Al, respectivamente.

Fonte: autor.

## CONCLUSÕES

O cultivar IAPAR-9 é mais tolerante ao Al que os demais cultivares avaliados.

Os cultivares de origem colombiana são mais sensíveis á toxidez do Al do que os genótipos brasileiros.

Entre os cultivares colombianos, Fedearroz-Lagunas apesar de enquadrar na categoria de sensível, apresentou tolerância a 10 mg L<sup>-1</sup> de Al na solução, distinguindo-se dos demais.

A alongação relativa radicular (ERR) pode ser considerada como variável de boa precisão para distinção entre cultivares tolerantes e sensíveis ao Al, para estudos em solução nutritiva.

## REFERÊNCIAS

- ALHRICHS, J. L.; DUNCAN, R. R.; EJETA, G et al. Pearl millet and sorghum tolerance to aluminium in acid soil. In: WRIGHT, R.J., BALIGAR, V.C., MURRAMANN, R.P. (Eds.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: The Netherlands, 1991. p. 947-1991.
- BALIGAR, V C.; DOS SANTOS, H. L.; PITTA, G. V. E. et al. Aluminium effects on grown, grain yield and nutrient use efficiency ratios in sorghum genotypes. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 116, p. 257-264, 1989.
- BALUSKA, F.; SAMAJ, J.; WOJTASZEK, P.; VOLKMANN, D.; MENZEL, D. Cytoskeleton plasma membrane-cell wal continuum in plants. Emerging links revisited. **Plant Physiology**, Rockville., v.133, p. 482-491, 2003.
- BLAMEY, F. P. C.; ASCHER, C. J. Aluminium toxicity. **A threat to food production, search**, India, v 24, n. 10, p. 296-298, 1993.
- CARE, D. A. The effect of aluminium concentration on root hairs in White clover (*Trifolium repens* L.). **Plant and Soil**, Netherlands, v 171, p. 159-162, 1995.
- CARVALHO, J. R. P.; FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, p.61-67, 2003.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-décimo segundo levantamento**. Brasília: CONAB, 2010. 41 p.
- DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Waterbury, Rockville, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DUNCAN, R. R.; CLARK, R. B.; FURLANI, P. R. Laboratory and field evaluations of sorghum for response to aluminium and acid soil. **Agronomy Journal**, Washington, v.75, p. 1023-1026, 1983.

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, jan. 1982.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; WRIGHT, R.J. The effects of aluminum on growth and uptake of Al and P by rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.6, p.677-682, jun. 1989.

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.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; DEUBER, R. Influência do alumínio no crescimento e na nutrição mineral de cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 6, p.203-208, 1982a.

FERREIRA, R. P.; CRUZ, C. D.; SEDIYAMA, C. S.; FAGERIA, N. K. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio pela técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n. 6, p.49-54, 1995.

FOY, C.D. The physiology of plant adaptation to mineral stress. **Iowa State Journal of Research**, Canadá, v. 57, n. 4, p. 355-391, 1983 b.

FREIRE, L. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; FERNANDES, M. S. et al. Efeito de alumínio nas raízes de arroz cultivado em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 5, p. 459-464, 1987.

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. 21-34, 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.

GANESAN, K., SANKARANARAYANAN, C., BALAKUMAR, T. Physiological basis of differential aluminum tolerance in rice genotypes. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Geórgia, v.24, p. 2179-2191, 1993.

GUIMARÃES, C. M; NEVES, C. F; STONE, L. F; ZIMMERMANN, J. P. Resistência do arroz de terras altas ao alumínio. **Rev. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grandi, v.10, n.4, p.855-860, 2006.

HOWELER, R.H.; CADAVID, L.F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, p.551-555, 1976.

ISHIKAWA, S.T.; WAGATSUMA, R.; IKARASHI, T. Comparative toxicity of  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ , and  $\text{La}^{3+}$  to root-tip cells differing in tolerance high  $\text{Al}^{3+}$  in terms of ionic potentials of dehydrated trivalent cations. *Soil Science and Plant Nutrition*, Georgia, v.42, n. 3, p. 613-625, 1996.

ISHIKAWA, S.T.; WAGATSUMA, R.; SASAKI, P. Comparison of the amount of citric and malic acids in Almedia of seven plant species and two cultivars each in five plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 46, p.751-758, 2000.

JACOB NETO, J. **The interactions of H/OH<sup>-</sup>exchanges** between roots and rhizosphere with plant nutrition and aluminum effects. Dundee:University of Dundee, 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.

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. 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.

KINRAIDE, T. B.; ARNOLD, R. C.; BALIGAR, V. C.A rapid assay for aluminum phytotoxicity at submicromolar concentrations. *Physiologia Plantarum*, v. 65, p.245-250, 1985.

KINRAIDE, T. B.; RYAN, P. R.; KOCHIAN, L. V. Interactive effects of  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^{+}$ , and other cations on root elongation considered in terms of cell surface electrical potential. *Plant Physiology*, v. 99, p. 1461-1468, 1992.

KIKUI, S.; SASAKI, T.; MAEKAWA, M.; MIYAO, A.; HIROCHIKA, H. Physiological and genetic analyses of aluminum tolerance in rice, focusing on root growth during germination. *J.Inorg. Biochem.* v. 99, p.1837-1844, 2005.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Annual Review. *Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 46, p. 237-260, 1995.

MACEDO, C; KINET, J. M.; VAN SINT, V. Effects of duration and intensity of aluminium stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminium sensitivity. *Journal of plant Nutrition*, v. 20, n.1, p. 181-193, 1997.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *Int. Rev. Cytol.*, v. 200, p. 1-46, 2000.

MENDONÇA, J. R.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, A. M.; OLIVEIRA, A. J. Capacidade de cultivares de arroz de modificar o pH de soluções nutritivas na presença de alumínio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 5, p. 447-452, 2005.

MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; SYMEONIDIS. Aluminum toxicity effects on durum wheat cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, v.15, n.5, p. 627-638, 1992.

PARKER, D. R. Root growth analysis: an underutilized approach to understanding aluminum rhizo toxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 171, p. 151-157, 1995.

PARKER, D. R.; KINRAIDE, T. B.; ZELAZNY, L. W. Aluminum speciation and phytotoxicity in dilute hydroxyl-aluminum solutions. **Soil Science Society of American Journal**, v. 52, p.438-444, 1988.

PINTRO, J.; BARLOY, J.; FALLAVIER, P. Aluminum effects on the growth and mineral composition of corn plants cultivated in nutrient solution at low aluminium activity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 19, n. 5, p.729-741, 1996.

REID, D. A.; FLEMING, A. L.; FOY, C. D.A Method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparision to response in Al-toxic soil. **Agronomy Journal**, v. 63, p. 600-603, 1971.

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. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, p. 437-446, 1993.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A., MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Influencia do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.4, p.787-796, 2000.

SANTOS, M. de L. M. **Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.)**. 1991. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SARTAIN, J. B.; KAMPRATH, E. J. Aluminum tolerance of soybean cultivars based on root elongation in solution culture compared with growth in acid soil. **Agronomy Journal**, v. 70, p. 17-20, 1978.

SCOTT, B. J.; FISHER, J. A. Comparing selection strategies for tolerance of acid soils. In: MARANVILLE, J. W. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANT TO SOIL STRESSES, 1993, Nebraska. **Proceedings...** Nebraska, 1993. p. 103-116.

SCOTT, B.J.; FISCHER, J. A.; SPOHR, L. J. Tolerance of Australian wheat varieties to aluminium toxicity.Communications. **Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, n. 5-6, p. 509-526, 1992.

SILVA, A. A. P. **Parâmetros biométricos e fisiológicos do crescimento de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) cv. Rio Paraíba submetidas a níveis crescentes de alumínio, em cultivo hidropônico**. 1992, 116p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1992.

SILVA, M. R. M. **Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura do arroz de terras altas**. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

SILVA, L. M.; COSTA, N. V.; CRUSCIOL, C. A.; VIEGAS, P. R. Sistema radicular de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Agrarian**, v.4, n.13, p.202-212, 2011.

SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical ricecultivars: II. Mechanismo faluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 9, p. 1717-1732, 1993b.

STRID, H. Effects of root zone temperature on aluminium toxicity in two cultivars of spring wheat with diferente resistance to aluminium. **Physiologia Plantarum**, v.97, p.5-12. 1996.

TAYLOR, G. C. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminium resistance. **Plant and Soil**, v.171, p. 89-103, 1995.

TICE, K. R.; PARKER, D. R.; DEMASON, D. A. Operationally defined apoplastic and symplastic aluminum fractions in root tips of aluminum intoxicated wheat. **Plant Physiology**, v.100, p. 309-318, 1992

VASCONSELOS, S. S.; ROSSIELLO, R. O. P.; JACOBENETO, J. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n.3, p.357-363, 2002.

VELOSO, C. A. C.; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T.; CARVALHO, E. J. M. Alumínio e absorção de cálcio por mudas de pimenta do reino. **Sci. Agric.**, v.57, n.1, p.1-6, 2000.

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.

WAGATSUMA, T.; ISHIKAWA, S.; OBATA, H. et al. Plasma membrane of younger and autor cells is the primary specific site for aluminium toxicity in roots. **Plant and Soil**, Netherlands, v.171, p. 105-112, 1995.

ZHANG, G.; TAYLOR, G. J. Effect of aluminum on growth and distribution of aluminum in tolerant and sensitive cultivars of (*Triticumaestivum* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Georgia, v. 7-12, p. 1195-1205, 1988.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aumentando as concentrações de Al na solução nutritiva, ocorrem reduções diferenciais na elongação radicular relativa entre os cultivares indicando variados graus de sensibilidade a este elemento.

Para o cultivar IAPAR-9, pequenas quantidade de Al na solução nutritiva estimula o crescimento tanto das raízes como da parte aérea das plantas de arroz.

As variáveis obtidas a partir de avaliações do sistema radicular, especialmente, a elongação radicular relativa e o crescimento máximo da raíz seminal, foram sensíveis o suficiente para estabelecer a distinção entre cultivares quanto à tolerância ao Al.

## REFERÊNCIAS

ALHRICHS, J. L.; DUNCAN, R. R.; EJETA, G et al. Pearl millet and sorghum tolerance to aluminium in acid soil. In: WRIGHT, R.J., BALIGAR, V.C., MURRAMANN, R.P. (Eds.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: The Netherlands, Kluwer, 1991. p. 947-1991.

ÁLVAREZ, A. **Estudios de procesos de degradación física de suelos y sistemas de manejo para controlarla**. Palmira: Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas, 2000.

AMEZQUITA, Edgar. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. In: ENCUESTRO NACIONAL DE LABRANZA DE CONSERVACIÓN. 10., 1998, **Villavicencio**, Colombia. p.145-174.

AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de latos solo bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.191-198, 1996.

BALIGAR, V C.; ANGHINONI, I.; PITTA, G. V. E. et al. Aluminium effects on plant and nutrient uptake parameters of soil and solution grown sorghum genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 18, n. 11, p. 2325-2338, 1995.

BALIGAR, V C.; DOS SANTOS, H. L.; PITTA, G. V. E. et al. Aluminium effects on grown, grain yield and nutrient use efficiency ratios in sorghum genotypes. **Plant and Soil**, v. 116, p. 257-264, 1989.

BALUSKA, F.; SAMAJ, J.; WOJTASZEK, P.; VOLKMANN, D.; MENZEL, D. Cytoskeleton plasma membrane-cell wal continuum in plants. Emerging links revisited. **Plant Physiol.**, v.133, p. 482-491, 2003.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance. **Environ. Expert. Bot.**, v. 48, p. 75-92, 2002.

BASSINELLO, A.I. **Interações de genótipos x ambientes em Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)** 1984. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.Paulo, 1984.

BLAMEY, F. P. C.; ASCHER, C. J. Aluminium toxicity. **A threat to food production, search**, v 24, n. 10, p. 296-298, 1993.

CÂMARA, G.M.S. Eco fisiologia da cultura da Cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. **Produção de Cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 31-64.

CAMBRAIA, J.; SILVA, M. A. DA; CANO, M. A. O. Método simples para avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 3, n. 2, p. 87-95, 1991.

- CARE, D. A. The effect of aluminium concentration on root hairs in White clover (*Trifolium repens* L.). **Plant and Soil**, v 171, p. 159-162, 1995.
- CARVALHO, J. R. P.; FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.61-67, 2003.
- CARVER, B. F.; OWNBY, J. D. Acidsoiltolerance in wheat. **Advances in Agronomy**, v. 54, p. 117-173, 1995.
- COCHRANE T, T.; SÁNCHEZ; L. F.; PORRAS J. A.; DE AZEVEDO L. G.; GARVER C. L. **Land in Tropical América.**), Colombia. 1985. v.1.
- COCHRANE T. T.; SÁNCHEZ L. F. Clima, paisaje y suelos de las sabanas tropicales de Suramérica. **Inverciências**, v. 6, p. 239-243,1981.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos—décimo segundo levantamento.** Brasília: CONAB, 2010. 41 p.
- DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants.**Plant Physiology**, Rockville, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.
- DUARTE, A.P.; VOLTAN, R.B.Q; FURLANI, P.R. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro à calagem. **Bragantia**, v. 58, n. 2, p. 353-361, 1999.
- DUNCAN, R. R.; CLARK, R. B.; FURLANI, P. R. Laboratory and field evaluations of sorghum for response to aluminium and acid soil. **Agronomy Journal**, v.75, p. 1023-1026, 1983.
- EVANS, C. E.; KAMPRAHT, E. J. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 34, p. 893-896, 1970.
- FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2303-2307, 2000.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screeningcroptypes for mineral stresses. In: MARANVILLE, J. W.; BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; YOHE, J. M. (Ed.). **Adaptation of plants to soil stress.**,1994. p. 142-159.
- FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. **Documentos**, 92, Embrapa-CNPAP, 42 p. 1999.
- 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.

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, jan. 1982.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; WRIGHT, R.J. The effects of aluminum on growth and uptake of Al and P by rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.6, p.677-682, jun. 1989.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; DEUBER, R. Influência do alumínio no crescimento e na nutrição mineral de cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 6, p.203-208, 1982.

FERREIRA, R DE P.; SALGADO, L. T.JORGE, H.D. Tolerância de cultivares de arroz ao alumínio. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.21.p.1257-1260.1986.

FERREIRA, R. P.; CRUZ, C. D.; SEDIYAMA, C. S.; FAGERIA, N. K. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio pela técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n. 6, p.49-54, 1995.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Editora Universitária, 2004. 528p.

FOY, C. D.; DUKE, J. A.; DEVINE, T.E. Tolerance of soybean germplasm to na acid Tatum subsoil. **Journal of Plant Nutrition**, v 15, n. 5, p. 527-547, 1992.

FOY, C. D.; DUNCAN, R. R.; WASKOM, R. M. Tolerance of sorghum genotypes to an acid, aluminum toxic Tatum subsoil. **Journal of Plant Nutrition**, v 16, n.1, p. 97-127, 1993.

FOY, C. D.; ORELLANA, R. G.; SCHWARTZ, J. W. et al. Responses of sunflower genotypes to aluminum in acid soil and nutrient solution.**Agronomy Journal**, v. 66, p. 293-296, 1974.

FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: THE PLANT ROOT AND ITS ENVIRONMENT, 1974, Charlottesville. **Anais...** Charlottesville : University of Virginia, 1974. p.601-642.

FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F (Ed.). **Soil Acidity and Liming**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p 57-97.

FOY, C.D.The physiology of plant adaptation to mineral stress.**Journal of Research**, Iowa State, v. 57, n. 4, p. 355-391, 1983.

FREIRE, L. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; FERNANDES, M. S. et al. Efeito de alumínio nas raízes de arroz cultivado em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 22, n. 5, p. 459-464, 1987.

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. 21-34, 1988.

FURLANI, P. R., FURLANI, A. M. Tolerância a alumínio e deficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. **Bragantia**, v.50, p.331-340, 1991.

FURLANI, P. R.; CLARK, R.B. Screening sorghum for aluminium tolerance in nutrient solutions. **Agronomy Journal**, v. 73, p. 587-594, 1981.

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.

FURTINE NETO, A. E.; TOKURA, A M.; RESENDE, A. V. **Interpretação de análise de Solo e Manejo da Adubação**. Lavras. Ed. UFLA. 2004. 159p.

GANESAN, K., SANKARANARAYANAN, C., BALAKUMAR, T. Physiological basis of differential aluminum tolerance in rice genotypes. **Communication in Soil Science and Plant analysis**, v.24, p. 2179-2191, 1993.

GARLAND CAMPBELL, K. A.; CARTER, T. E., Jr. Aluminum tolerance in soybean: In Genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. **Crop Science**, v. 30, p. 1049-1054, 1990.

GUIMARÃES, C. M; NEVES, C. F; STONE, L. F; ZIMMERMANN, J. P. Resistência do arroz de terras altas ao alumínio. **Rev. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.4, p.855-860, 2006.

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.

HILL, P. R.; AHLRICHS, J. L.; EJETA, G. Rapid evaluation of sorghum for aluminum tolerance. **Plant and Soil**, v.114, p. 85-90, 1989.

HORTS, W. J. Quick screening of cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes for aluminium tolerance in an aluminium treated acid soil. **Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.**, v. 148, p. 335-348, 1985.

HORTS, W. J.; ASHER, C. J.; CAKMAK, I. Short term responses of soybean roots to aluminium. **Journal of Plant Physiology**, v. 140, p. 174-178, 1992.

HORTS, W. J.; KLOTZ, F. Screening soybean for aluminum tolerance and adaptation to acid soils. In: EL BASSAM, N. et al. **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Kluwer Academic Publishers, 1990. p.355-360.

HORTS, W. J.; KLOTZ, F.; SZULKIEWICZ, P. Mechanical impedance increases aluminum tolerance of soybean (*Glycine max*) roots. **Plant and Soil**, v. 124, p. 227-231, 1990.

HOWELER, R.H.; CADAVID, L.F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, p.551-555, 1976.

HUANG, C.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; YANO, M.; NAGAMURA, Y. A bacterial-type ABC transporter is involved in Aluminum tolerance in rice. **Plant Cell**, V. 21, p. 655-667, 2009.

ISHIKAWA, S.T.; WAGATSUMA, R.; IKARASHI, T. Comparative toxicity of  $Al^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ , and  $La^{3+}$  to root-tip cells differing in tolerance high  $Al^{3+}$  in terms of ionic potentials of dehydrated trivalent cations. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 42, n. 3, p. 613-625, 1996.

ISHIKAWA, S.T.; WAGATSUMA, R.; SASAKI, P. Comparison of the amount of citric and malic acids in Almedia of seven plant species and two cultivars each in five plant species. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 46, P. 751-758, 2000.

JACOB NETO, J. **The interactions of H/OH<sup>-</sup>exchanges** between roots and rhizosphere with plant nutrition and aluminum effects. Dundee: University of Dundee, 1993. 281p.

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.

KERRIDGE, P. C.; DAWSON, M. D.; MOORE, D. P. Separation of degrees of aluminum tolerance in wheat. **Agronomy Journal**, v 63, p. 586-590, 1971.

KIKUI, S.; SASAKI, T.; MAEKAWA, M.; MIYAO, A.; HIROCHIKA, H. Physiological and genetic analyses of aluminum tolerance in rice, focusing on root growth during germination. **J.Inorg. Biochem.** v. 99, p. 1837-1844, 2005.

KINRAIDE, T. B.; ARNOLD, R. C.; BALIGAR, V. C. A rapid assay for aluminum phytotoxicity at submicromolar concentrations. **Physiologia Plantarum**, v. 65, p. 245-250, 1985.

KINRAIDE, T. B.; RYAN, P. R.; KOCHIAN, L. V. Interactive effects of  $Al^{3+}$ ,  $H^{+}$ , and other cations on root elongation considered in terms of cell surface electrical potential. **Plant Physiology**, v. 99, p. 1461-1468, 1992.

KINRAIDE, T. B. Aluminum enhancement of plant growth in acid rooting media. A case of reciprocal alleviation of toxicity by two toxic cations. **Physiologia Plantarum**, v. 88, p. 619-625, 1993.

KLEINHEISTERKAMP, I.; HÄBICH, G. Colombia: Estudio biológico y técnico. In: VERA, R.R.; SERÉ, C. (Eds.). **Sistemas de Producción Pecuaria Extensiva**: Colombia: Centro Internacional de agricultura tropical, 1985. p. 213-278.

KOCHIAN L.V.; JONES D.L. Aluminum toxicity and resistance in plants. In: YOKEL, R.A.; GOLUB, M.S (Eds.). **Research Issues in Aluminum, Toxicity**. Washington: Taylor and Francis, 1997. p 69–89.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Annual Review **Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, 1995.

LAZOF, D. B.; GOLDSMITH, J. G.; RUFFY, T. W. et al. Rapid uptake of aluminum into cells of intact soybean root tips. **Plant Physiology**, v. 106, p. 1107-1114, 1994.

LE VAN, H.; KURAISHI, S.; SAKURAI, N. Aluminium induced rapid root inhibition and changes in cell-wall components of squash seedlings. **Plant Physiology**, v 106, p. 971-976. 1994.

LITTLE, R. Plant soil interactions at low pH problem solving the genetic approach. Communications in: **Soil Science and Plant Analysis**, v.19, n. 7-12, 1239-1257, 1988.

LLUGANY, M.; POSCHIENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Monitoring of aluminium induced inhibition of root elongation in four maize cultivars differing in tolerance to aluminium and proton toxicity. **Physiologia Plantarum**, v.93, p. 265-271, 1995.

MACEDO, C; KINET, J. M.; VAN SINT, V. Effects of duration and intensity of aluminium stress on growth parameters in four rice genotypes differing in aluminium sensitivity. **Journal of plant Nutrition**, v. 20, n.1, p. 181-193, 1997.

MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R.; FULLER, W. H. Aluminum and Silica Solubility in Soils. **Soil science**, v. 121, n. 2, Feb. 1976.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **Int.Rev. Cytol.** v. 200, p. 1-46, 2000.

MENDONÇA, J. R.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, A. M.; OLIVEIRA, A. J. Capacidade de cultivares de arroz de modificar o pH de soluções nutritivas na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 447-452, 2005.

MENDONÇA, M.L.S. **Estudos dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.)**. 1991. 176p. Dissertação (Mestrado) - UFRRJ, Itaguaí, 1991.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. de. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Gleic Pouco Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 209-215, 2000.

MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; LANNOYE, R. Aluminum effects on photosynthesis and elemental uptake in aluminum tolerant and non-tolerant wheat cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v.18, n.4, p. 669-683, 1995.

MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; SYMEONIDIS. Aluminum toxicity effects on durum wheat cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v.15, n.5, p. 627-638, 1992.

NOVAIS, R. F.; Alvarez, v. h.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. Acidez do solo e sua correção. In: SOUSA, D. M.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. **Fertilidade do Solo**. Viçosa : UFV, 2007. p.205-274.

OKADA, K.; FISCHER, A.; PEREZ, F. Difference in the retention of Ca and Al as possible mechanisms of Al resistance in upland rice. **Soil Sci. Plant Nutr.**, v. 49, p. 889-895, 2003.

OLIVETTI, G. P.; CUMMING, J. R.; ETHEERTON, B. Membrane potential depolarization of root cap cells precedes aluminum tolerance in snapbean. **Plant Physiology**, v. 109, p. 123-129. 1995.

PALADINES, O. Manejo y productividad de las praderas en los Llanos Orientales de Colombia. In:\_\_\_\_\_. **Producción de Pastos en suelos Ácidos de los Trópicos**. Cali, Colombia: Centro Internacional de agricultura tropical, 1999. p. 331-346.

PALIWAL, K.; SIVAGURU, M. Indirect effects of aluminum on the reflectance properties of rice cultivars differing in aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, v. 17, n.6, p. 883-897, 1994.

PARKER, D. R.; KINRAIDE, T. B.; ZELAZNY, L. W. Aluminum speciation and phytotoxicity in dilute hydroxyl-aluminum solutions. **Soil Science Society of American Journal**, v. 52, p.438-444, 1988.

PARKER, D. R. Root growth analysis: an underutilized approach to understanding aluminum rhizo toxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.171, p. 151-157, 1995.

PINTRO, J.; BARLOY, J.; FALLAVIER, P. Aluminum effects on the growth and mineral composition of corn plants cultivated in nutrient solution at low aluminium activity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 19, n. 5, p.729-741, 1996.

POSCHENRIEDER, C. B.; GUNSÉ, I.; CORRALES, J. BARCELÓ. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. **Sci. Total Environ**. v. 400, p. 356-368, 2008.

REID, D. A.; FLEMING, A. L.; FOY, C. D. A Method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. **Agronomy Journal**, v. 63, p. 600-603, 1971.

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.

SALIM, M.; SAXENA, R. C. Iron, silica and aluminum stress and varietal resistance in rice: Effects on white backed plant hopper. **Crop Science**, v. 32, p. 212-219. 1992.

SALVADOR, J. O. et al. Influencia do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 24, n.4, p.787-796, 2000.

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. (Eds). **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p. 35-46. (SSSA, Special publication, 29).

SANTOS, M. de L. M. **Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.)**. 1991. 176 f. Dissertação (Mestrado) - UFRRJ, Seropédica, 1991.

SANZ J. I., ZEIGLER R. S.; SARKARUNG S.; MOLINA D. L.; RIVERA, M. Sistemas mejorados arroz-pasturas para sabana nativa y pasturas degradadas ensuelos ácidos de América delSur. In: GUIMARAES, E.P.; SANZ, J.I.; RAO, I.M.; AMÉZQUITA, M.C.; AMÉZQUITA, E. (Eds.). **Sistemas Agropastoriles en Sabanas de América Latina**. Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Empresa, 1999.

SARTAIN, J. B.; KAMPRATH, E. J. Aluminum tolerance of soybean cultivars based on root elongation in solution culture compared with growth in acid soil. **Agronomy Journal**, v. 70, p. 17-20, 1978.

SCHAFFERT, R.E.; ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E. et al. Genetic variability in sorghum for efficiency and responsiveness. In: HORST, W.J. et al. (Eds.). **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. p. 72-73.

SCHAFFERT, R.E.; ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E.; BAHIA, A.F.C.; SANTOS, F.G.SCOTT, B. J.; FISHER, J. A. Comparing selection strategies for tolerance of acid soils. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANT TO SOIL STRESSES, 1993, Nebraska. **Proceedings...Nebraska**, 1993. p. 103-116.

SCOTT, B.J.; FISCHER, J. A.; SPOHR, L. J. Tolerance of Australian wheat varieties to aluminium toxicity. Communications in **Soil Science and Plant Analysis**, v. 23, n. 5/6, p. 509-526. 1992.

SILVA, A. A. P. **Parâmetros biométricos e fisiológicos do crescimento de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) cv. Rio Paraíba submetidas a níveis crescentes de alumínio, em cultivo hidropônico**. 1992. 116 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1992.

SILVA, A. A. **Toxicidade de alumínio em trinta genótipos de *Panicum maximum* Jacq. Cultivados em solução nutritiva**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997. 149 p.

SILVA, L. M.; COSTA, N. V.; CRUSCIOL, C. A.; VIEGAS, P. R. Sistema radicular de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Agrarian**, v.4, n.13, p.202-212, 2011.

SILVA, M. R. M. **Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura do arroz de terras altas**. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

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.

STRID, H. Effects of root zone temperature on aluminium toxicity in two cultivars of spring wheat with different resistance to aluminium. **Physiologia Plantarum**, v.97, p.5-12. 1996.

TANG VAN HAI.; NGA, T. T.; LAUDELOUT, H. Effect of aluminium on the mineral nutrition rice. **Plant and Soil**, v.114, p. 173-185. 1989.

TAYLOR, G. C. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminium resistance. **Plant and Soil**, v.171, p. 89-103. 1995.

TAYLOR, G. J.; MCDONALD-STEPHENS, J. L.; HUNTER, D. B.; BERTSCH, P. M.; ELMORE, D.; RENGEL, Z. Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. **Plant Physiol.**, v, 123, p. 987-996, 2000.

TICE, K. R.; PARKER, D. R.; DEMASON, D. A. Operationally defined apoplastic and symplastic aluminum fractions in root tips of aluminum intoxicated wheat. **Plant Physiology**, v.100, p. 309-318. 1992

URREA-GÓMEZ, R.; CEBALLOS, H.; PANDEY, S. A greenhouse screening technique for acid soil tolerance in maize. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 806-812, 1996.

VASCONSELOS, S. S.; ROSSIELLO, R. O. P.; JACOBE-NETO, J. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n.3, p.357-363, 2002.

VELOSO, C. A. C., MALAVOLTA, E., MURAOKA, T., CARVALHO, E. J. M. Alumínio e absorção de cálcio por mudas de pimenta do reino. **Sci. Agric.**, v.57, n.1, p.01-06, 2000.

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.

VON UEXKULL K.; MUTERT E. Global extent development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, v.171, p.1-15. 1995.

WAGATSUMA, T.; ISHIKAWA, S.; OBATA, H. et al. Plasma membrane of younger and older cells is the primary specific site for aluminium toxicity in roots. **Plant and Soil**, v.171, p. 105-112. 1995.

WHEELER, D. M.; WILD, D. J. C.; HEDMEADES, D. C. Preliminary results from a microscopic examination on the effects of aluminium on the root tips of wheat. **Plant and Soil**, v. 146, n. 1-2, p.83-87, 1992.

WRIGHT, R. J. Soil aluminum toxicity and plant growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.20, n.15, p.1479-1497. 1989.

YANG, J.; YOU, J.; LI, Y.; WU, P.; ZHENG, S. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity. **Plant Cell Physiol**. v. 48, p. 66-73, 2007.

ZHANG, G.; TAYLOR, G. J. Effect of aluminum on growth and distribution of aluminum in tolerant and sensitive cultivars of (*Triticum aestivum* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 7-12, p. 1195-1205. 1988.