

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CRESCIMENTO RADICULAR E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DE
CULTIVARES DE ARROZ SUBMETIDOS AO ALUMÍNIO EM
SOLUÇÃO NUTRITIVA**

LAERTE MARQUES DA SILVA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia – Área de Concentração
Agricultura.

BOTUCATU - SP
Fevereiro – 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CRESCIMENTO RADICULAR E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DE
CULTIVARES DE ARROZ SUBMETIDOS AO ALUMÍNIO EM
SOLUÇÃO NUTRITIVA**

LAERTE MARQUES DA SILVA

Prof. Dr. Leandro Borges Lemos
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol
Co-orientador

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia – Área de concentração
Agricultura.

BOTUCATU
Fevereiro – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S586c Silva, Laerte Marques da, 1972-
Crescimento radicular e absorção de nutrientes de cul-
tivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutri-tiva / Laerte
Marques da Silva. - Botucatu : [s.n.] 2007.
xii, 87 f. : gráfs., tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Facul-
dade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007
Orientador: Leandro Borges Lemos
Co-orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol
Inclui bibliografia.

1. *Oryza sativa* L. 2. Arroz - Raízes. 3. Absorção. 4. Plan- tas - Nutrição. 5.
Alumínio. I. Lemos, Leandro Borges. II. Crusciol, Carlos Alexandre Costa.
III. Universidade Esta- dual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de
Botuca- tu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

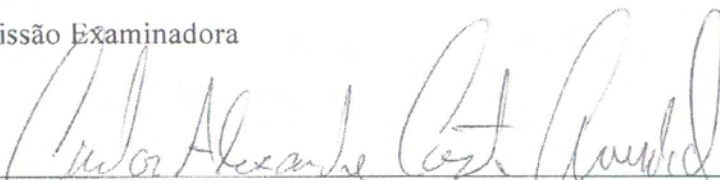
TÍTULO: "CRESCIMENTO RADICULAR E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES
DE CULTIVARES DE ARROZ SUBMETIDOS AO ALUMÍNIO
EM SOLUÇÃO NUTRITIVA"

ALUNO: LAERTE MARQUES DA SILVA

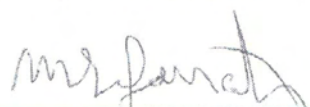
ORIENTADOR: PROF. DR. LEANDRO BORGES LEMOS

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

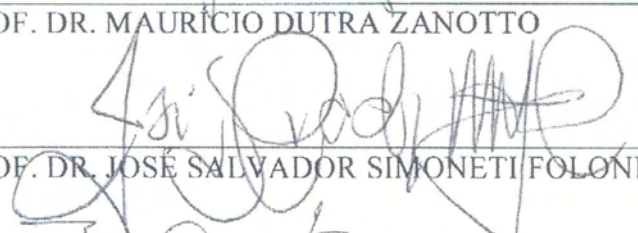
Aprovado pela Comissão Examinadora



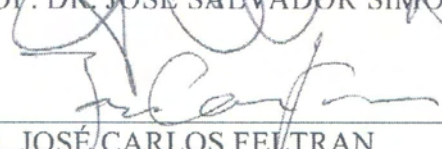
PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL



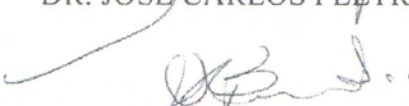
PROF. DR. MAURÍCIO DUTRA ZANOTTO



PROF. DR. JOSÉ SALVADOR SIMONETI FOLONI



DR. JOSÉ CARLOS FELTRAN



DR. SANDRO ROBERTO BRANCALHÃO

Data da Realização: 26 de fevereiro de 2007.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Laerte Marques da Silva, filho de Hildo Marques da Silva e Terezinha Alves da Silva, nasceu em Ilha Solteira, Estado de São Paulo, no dia 09 de outubro de 1972.

Em 1995, iniciou o curso de Engenharia Agronômica pela Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal – FAEF, concluindo-o em 1999.

Em 2000, iniciou o curso de pós - graduação (Mestrado) em Agronomia, Área de Concentração Agricultura, pela Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, concluindo-o em 2002, em agosto do mesmo ano, inicio o Curso de pós - graduação (Doutorado) em Agronomia, Área de Concentração Agricultura, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, concluindo-o em fevereiro 2007.

Atualmente desenvolve atividades de docência e consultoria.

A DEUS

Que sempre esteve comigo, que me
amparou, protegeu e me inspirou nesta luta
que hoje se torna realidade.

AGRADEÇO

Aos meus pais Hildo marques da Silva e
Terezinha Alves da Silva.
Aos meus irmãos Valdez e Laércio.
Ao meu filho José Vitor Marques da Sousa.

DEDICO

Ao meu grande amigo Neumarcio, que tanto
me apoiou nos momentos mais difíceis.

OFEREÇO

Há homens que lutam por um dia e são bons;
Há outros que lutam por um ano e são melhores;
Existem aqueles que lutam muitos anos e são bons;
Porém existem os que lutam toda vida;
Esses são imprescindíveis.

“Autor desconhecido”

AGRADECIMENTO

- Ao meu amigo e orientador professor Doutor Carlos Alexandre Costa Crusciol pelos ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade que o tempo afirmou;
- Aos professores Leandro Borges Lemos, Mauricio Zanotto e Dagoberto Martins pelo apoio e crédito na minha pessoa;
- Ao professor Rogério Peres Soratto pela amizade, conversa e sugestão mediante a este trabalho;
- Ao meu tio e grande amigo Alberto Alves da Silva, por toda a presteza, carinho, atenção e pelas palavras de estímulo em todos os momentos;
- Aos professores do Departamento de Agricultura, que foram realmente meus mestres;
- Aos funcionários do câmpus e do laboratório relação solo planta do Departamento de Agricultura;
- À Faculdade de Ciência Agronômicas/UNESP, Câmpus de Botucatu, pela oportunidade de realizar o curso;
- Ao Departamento de Produção Vegetal da FCA/UNESP, onde me sinto em casa;
- Ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa;
- Aos amigos Neumarcio, Leonindo e Vanessa pela grande colaboração no presente trabalho;
- Aos amigos que fiz e que jamais esquecerei, tornando os melhores anos da minha vida,

Edwin, Neumarcio, Gustavo, Emerson, Munir, Tiago, Rogério, Leonindo, José Salvador, José Carlos, Sandro, João, Andréia, Anielo, Ana Paula, Max, Leopoldo, Mauro, Rodolfo, Paula Guaita;

- Aos meus colegas de curso de pós graduação pela convivência e amizade;
- Aos professores e pesquisadores que fizeram parte da banca de defesa pelas sugestões de melhora deste trabalho;
- Á todos que colaboraram de alguma forma para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

	Página
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO DE LITERATURA	7
5. MATERIAL E MÉTODOS	16
5.1. Localização do experimento	16
5.2. Delineamento experimental e tratamento empregado	16
5.3. Descrição de cultivares	17
5.3.1. BRS. Talento	17
5.3.2. Caiapó	17
5.3.3. Primavera	18
5.4. Instalação e condução do experimento	18
5.5. Avaliações	21
5.6. Comprimento, superfície, volume e diâmetro radicular	21
5.6.1. Altura de planta	21
5.6.2. Número de perfilhos por planta	21
5.6.3. Produção de matéria seca e teores de nutrientes do sistema radicular e da parte aérea	22
5.6.4. Quantidade acumulada de nutrientes na raiz, parte aérea e absorvida por metro de raiz	22

5.5.	Análise estatística	22
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6.1.	Crescimento radicular e produção de matéria seca da raiz	23
6.2.	Produções de matéria seca da parte aérea, total, números de perfilho e altura de planta	29
6.3.	Teores de nutrientes na raiz e na parte aérea	35
6.4.	Quantidade acumulada de nutrientes nas raízes e na parte aérea	51
6.5.	Quantidade absorvida de nutrientes, na parte aérea, por metro de raiz	65
7.	CONCLUSÕES.....	73
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Composição da solução nutritiva	20
Tabela 2. Composição final da solução nutritiva	20
Tabela 3. Valores médios de comprimento, superfície, volume, diâmetro e massa seca do sistema radicular, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	24
Tabela 4. Valores médios de matéria seca parte aérea, matéria seca total e números de perfilho por planta e altura de planta, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	30
Tabela 5. Teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco em raízes, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	36
Tabela 6. Teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco na parte aérea, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	37
Tabela 7. Quantidade acumulada de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco nas raízes, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	52
Tabela 8. Quantidade acumulada de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco na parte aérea, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005.....	53
Tabela 9. Quantidade de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco absorvidos por metro de raiz, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP)-2005..	66

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comprimento radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	26
Figura 2. Superfície radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	27
Figura 3. Volume radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	27
Figura 4. Diâmetro radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	28
Figura 5. Matéria seca radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	28
Figura 6. Matéria da seca parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	33
Figura 7. Matéria seca total de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	33
Figura 8. Número de perfilhos por planta em cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	34
Figura 9. Altura da planta de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	34
Figura 10. Teor de nitrogênio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	39
Figura 11. Teor de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	40
Figura 12. Teor de fósforo na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	40
Figura 13. Teor de fósforo na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	41
Figura 14. Teor de potássio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	42
Figura 15. Teor de potássio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	42
Figura 16. Teor de cálcio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	43

Figura 17. Teor de cálcio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	44
Figura 18. Teor de magnésio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	46
Figura 19. Teor de magnésio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	46
Figura 20. Teor de cobre na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	47
Figura 21. Teor de cobre na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	47
Figura 22. Teor de ferro na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.	48
Figura 23. Teor de ferro na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	48
Figura 24. Teor de manganês na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	49
Figura 25. Teor de manganês na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	49
Figura 26. Teor de zinco na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	50
Figura 27. Teor de zinco na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	50
Figura 28. Nitrogênio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	55
Figura 29. Nitrogênio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	55
Figura 30. Fósforo acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	57
Figura 31. Fósforo acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	57

Figura 32. Potássio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	58
Figura 33. Potássio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	58
Figura 34. Cálcio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	59
Figura 35. Cálcio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	59
Figura 36. Magnésio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	60
Figura 37. Magnésio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	60
Figura 38. Cobre acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	61
Figura 39. Cobre acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	61
Figura 40. Ferro acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	62
Figura 41. Ferro acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	62
Figura 42. Manganês acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	63
Figura 43. Manganês acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	63
Figura 44. Zinco acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	64
Figura 45. Zinco acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	64
Figura 46. Nitrogênio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	67

Figura 47. Fósforo absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	68
Figura 48. Potássio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	69
Figura 49. Cálcio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	69
Figura 50. Magnésio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	70
Figura 51. Cobre absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	70
Figura 52. Ferro absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	71
Figura 53. Manganês absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	71
Figura 54. Zinco absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.....	72

1. RESUMO

A cultura do arroz no Brasil apresenta baixa produtividade de grãos tendo entre as várias causas, o cultivo em solos de baixas fertilidades com altos níveis de alumínio tóxico na solução e o baixo uso de insumos agrícolas, sendo incipiente os estudos sobre o desenvolvimento do sistema radicular de cultivares de arroz associados aos grupos comerciais moderno, intermediário e tradicional. Em função do exposto, o presente trabalho objetivou estudar as respostas de cultivares de arroz, quanto ao crescimento radicular, desenvolvimento da parte aérea e a nutrição das plantas sob diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. O experimento foi conduzido em solução nutritiva em condições de casa-de-vegetação, no Departamento de Produção Vegetal da FCA/UNESP, Câmpus de Botucatu, no ano de 2005. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com quatro repetições, seguindo um modelo fatorial 3x4, com três cultivares de arroz (BRS Talento, Caiapó e Primavera) e quatro níveis de alumínio na solução nutritiva (0,0; 10,0; 20,0 e 40, 0 mg L⁻¹). Pelos resultados obtidos concluiu-se que, a cultivar Primavera é mais tolerante á toxidez de Al³⁺, enquanto BRS Talento e Caiapó são mais sensíveis à toxicidade de Al³⁺, o

sistema radicular, a massa seca das raízes, da parte aérea e total são bons indicadores de tolerância ao Al^{3+} , níveis tóxicos de Al^{3+} , interferem no transporte de P, K, Ca, Mg e Mn para a parte aérea, o P, Mg e Mn são os nutrientes menos acumulados pelo arroz sob estresse de Al^{3+} , a eficiência de absorção do sistema radicular fica comprometida pelo estresse de Al^{3+} , principalmente para o P e Mg.

Palavras – chave: *Oryza sativa* L., alumínio, sistema radicular, absorção de nutrientes.

ROOT GROWTH AND MINERAL NUTRITION ABSORTION OF RICE CULTIVARS SUBMITTED ON ALUMINUM SOLUTION.

Botucatu, 2007. 87p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LAERTE MARQUES DA SILVA.

Adviser: LEANDRO BORGES LEMOS

Co-adviser: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

2. SUMMARY

The rice field in Brasil show low yields having many factors affecting as planting in soil with low fertility with high levels of toxic aluminum and low use of technology and fertilizer, being incipient the studies about the development of radicular system of rice cultivars to the modern, intermediate and tradicional groups. This work objected to study rice cultivars response for root growth, vegetative parts development and nutrition of plants submitted to different levels of aluminum in nutritive solution. The experimente was conduct in nutritive solution inside the greenhouse at the Departament of Vegetal Production on FCA/UNESP , Botucatu Campus, in 2005. The experimental design used was completelly randomized with four replications, 3x4 factorial design, with three rice cultivars (BRS Talento, Caiapó and Primavera) and four aluminum levels on nutritive solution (0,0, 10,0, 20,0 e 40,0 mg L⁻¹). Results showed that the cultivar Primavera is more tolerant to Al⁺³ toxicity, while BRS Talento and Caiapó are more sensitive. Root system development, root dry matter and vegetative part development are good indicators of Al⁺³ tolerance. High levels of aluminum interfere P, K, Ca, Mg e Mn transportation to vegetative parts, and P, Mg e Mn are the less

accumulative nutrients for rice under Al^{+3} stress. Absorption of P and Mg by the root system is damage under Al^{+3} stress.

Keywords: *Oryza sativa* L., aluminum, root growth, nutrient absorption

3. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa a décima colocação no cenário mundial da produção de arroz, e a primeira fora dos países asiáticos, participando com 11,7 milhões de toneladas de arroz na safra de 2005/2006 (CONAB, 2006). Um terço desta produção provem de lavouras do ecossistema de terras altas, que representa 2/3 da área cultivada com arroz (CRUSCIOL et al., 2005). No entanto, em nível nacional apresenta baixa produtividade de grãos, com médias inferiores a 2000 kg ha⁻¹, porém com potencial superior a 6000 kg ha⁻¹ cultivado em ecossistema de terras altas (GUIMARÃES & SANT'ANA, 1999). Dentre as várias causas para a baixa produtividade desta cultura destacam-se a exploração de áreas marginais em termos de fertilidade do solo, associado ao pouco investimento em insumos agrícolas como o uso de fertilizantes e corretivos.

A calagem tem sido a prática mais comumente utilizada para neutralizar a acidez do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes, diminuir os elementos tóxicos, melhorar o ambiente radicular e restaurar a capacidade produtiva dos solos. Contudo,

a reação do calcário é lenta, corrigindo apenas as camadas superficiais do solo, enquanto o subsolo permanece ainda ácido, em um primeiro momento.

Associado a tudo isto, torna-se necessário um programa de seleção de cultivares de arroz com capacidade produtiva para solos de baixa fertilidade e alta acidez. No Brasil a maioria dos solos é ácida e apresentam baixa fertilidade natural e altos teores de alumínio tóxicos (Al^{+3}) para as plantas. A baixa fertilidade destes solos é um problema complexo, e as razões para o baixo desenvolvimento das plantas ainda não são totalmente esclarecidas.

A ocorrência de alumínio em concentrações tóxicas no solo é considerada como a principal causa de baixas produtividades de grãos (BLAMEY et al., 1992). Plantas sob estresse de alumínio paralisam o crescimento radicular impedindo a obtenção de água das camadas mais profundas, além de prejudicar o crescimento das plantas e reduzir a absorção e utilização de nutrientes de forma eficiente (CAMARGO et al., 1998). Esse conjunto de fatores pode variar de acordo com a espécie da planta, tipo de solo, valor de pH no solo, concentração e espécie de alumínio, estrutura e aeração do solo e clima.

Portanto, o conhecimento individual do padrão de crescimento do sistema radicular de cultivares de arroz na presença de Al^{+3} é de fundamental importância para a eficiente exploração dos solos ácidos e melhor aproveitamento da adubação, acarretando em maior absorção de nutrientes. Além disso, cultivares com sistema radicular mais desenvolvidos e vigorosos têm a probabilidade de apresentar maior estabilidade de produção e melhor adaptação em áreas marginais quanto à fertilidade do solo.

O objetivo do presente trabalho foi de estudar o crescimento radicular, o desenvolvimento e a nutrição mineral das plantas de cultivares de arroz sob diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva.

4. REVISÃO DE LITERATURA

O alumínio (Al^{3+}) é o terceiro elemento químico em abundância presente na litosfera, devido à sua participação nos minerais primários e secundários, encontrando-se atrás, da ordem de abundância, do oxigênio (O_2) e silício (Si). No solo, o alumínio é um importante constituinte da fração mineral ocorrendo como Al_2O_3 que, juntamente com o silício, compõe os minerais de argila da rede cristalina 1:1 e 2:1, além de ocorrer absorvido à matéria orgânica e aos próprios minerais (MENGEL & KIRKBY, 1987). Os solos ácidos abrangem 30% das terras livres de gelo (VON UEXKULL & MUTERT, 1995) e 40% das terras agricultáveis no mundo (OSMOND et al., 1980) localizando-se predominantemente nas regiões tropicais e subtropicais.

A maior área de solos ácidos do mundo está localizada na América do Sul, seguida pela África. Na região tropical da América do Sul, os solos ácidos ocupam 85% da área total (FAGERIA & STONE, 1999), totalizando aproximadamente 500 milhões de ha^{-1}

de Oxissolos e Ultissolos que são sub-utilizados devido á extrema acidez, e reduzida fertilidade e alta saturação do complexo de troca por alumínio e manganês (FAGERIA, 1982). No Brasil, as regiões Norte e Centro-Oeste apresentam 74% de solos ácidos, seguida da região Sudeste, com 63%, Sul, com 57% e Nordeste, com 41% (ROSOLEM, 1990). Malavolta & Kliemann (1985), afirmam que no Brasil, com exceção da região nordeste, cerca de 200 milhões de ha⁻¹ dos solos sob “cerrado” caracterizam-se ácidos, com pH baixo, pobre em bases trocáveis e alta saturação por manganês e alumínio, sendo que, cerca de 40% da extensão original das áreas sob cerrado estão convertidas em agricultura (RATTER & RIBEIRO, 1996), dos quais 45 milhões de ha⁻¹ são ocupados por pastagens cultivadas (BARCELLOS, 1996).

O conhecimento da química do alumínio em solos ácidos é de grande interesse, principalmente, devido aos efeitos nocivos do íon Al³⁺ no crescimento vegetal. A acidez do solo limita a produção agrícola, decorrendo da interação de vários fatores, tais como o aumento da concentração de H⁺, Al³⁺ e Mn²⁺, a diminuição das concentrações dos cátions Mg²⁺, Ca²⁺ e K⁺ e, da solubilidade de P e Mo, acarretando em inibição do crescimento de raízes e absorção de água. Além disso, provoca redução da atividade microbiana benéfica para as plantas, menor desenvolvimento e conseqüentemente, redução na massa seca que protege o solo causando assim maior incidência de erosão, além do aumento de doenças, principalmente as fúngicas em razão da má nutrição das plantas, que prejudicam o seu crescimento (MARSCHNER, 1995; FAGERIA & STONE, 1999; FREITAS et al., 2006). Esse conjunto de fatores pode variar de acordo com a espécie e genótipos de planta, tipo e horizonte do solo, valor de pH, concentração e espécie de Al³⁺, estrutura e aeração do solo e clima.

Os solos podem ser naturalmente ácidos em razão da pobreza do material de origem em cálcio, magnésio, potássio e sódio, denominados bases ou mediante processos de formação ou de manejo de solos que levam à perda dessas bases e, portanto, à acidificação (QUAGGIO, 2000).

O processo de acidificação consiste na remoção de cátions para camadas mais profundas do solo, fora do alcance das raízes, ou também pela extração dos mesmos pelas culturas, mediante a colheita dos grãos ou, principalmente, pela remoção da parte aérea para produção de silagem, como o verificado por Mateus (2003). Assim, os solos que se encontram nas zonas de clima quente e com altas precipitações pluviais são, em sua grande maioria ácidos, mesmo que o material de origem não tenha reação ácida quando em

contato com a água (BOHNEN, 2000). Ao longo do tempo os cátions, que por sua natureza química, formam compostos mais solúveis, vão sendo lixiviados através do perfil do solo em razão das regiões de altas precipitações pluviométricas.

Outra mudança que ocorre durante a constituição do solo a partir da rocha, é a formação de argilas e substâncias húmicas, com capacidade de atrair íons com carga positiva até sua superfície. No entanto, esta atração é proporcional, principalmente, à valência dos íons. O Al^{3+} com três valências é mais fortemente atraído para as proximidades das partículas com cargas negativas, em detrimento do sódio (Na^+) e potássio (K^+) com uma valência, e do cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) com duas valências. Com isto, o alumínio permanece no solo, enquanto os outros cátions tendem a serem lixiviados. Esta é a razão que faz os solos tropicais terem muito Al^{3+} e baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ na forma trocável (BOHNEN, 2000).

Os íons presentes na solução do solo e, principalmente, o alumínio que se encontram hidratados possuem propriedades químicas capazes, de quando em contato com a água, faz com que esta seja decomposta, liberando íons hidrogênio, que podem reduzir o pH do solo, mediante reação de hidrólise (LUCHESE et al., 2001).

As plantas por meio do processo de absorção de cátions, liberam na rizosfera íons hidrogênio (H^+) para manter a eletroneutralidade do meio, contribuindo para a acidificação do solo (TAIZ & ZEIGER, 2004). Esse processo é mais intenso nas leguminosas que absorvem mais cátions, como Ca^{+2} e Mg^{+2} , quando comparadas às gramíneas, pois as leguminosas com nodulação eficiente, não absorvem tanto nitrato (NO_3^-) quanto às gramíneas, favorecendo o acúmulo de íons H^+ na rizosfera (BOHNEN, 2000).

Os microrganismos do solo, quando decompõem os resíduos vegetais no processo de mineralização e formação de substância húmicas, podem contribuir para a acidez do solo, mediante a formação de CO_2 , NO_3^- e H^+ (HELYAR, 2003). Além disso, se ocorrer percolação, os cátions que não estão atraídos pelas cargas negativas do solo podem ser lixiviados juntamente com o nitrato ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e KNO_3), deixando nas camadas mais superficiais os íons hidrogênio que vão manter o pH do solo mais baixo. E com isto, os pontos de troca de cargas negativas vão sendo gradativamente ocupados pelo Al^{3+} e, em certos solos, pelo Mn^{2+} (BOHNEN, 2000).

A adição de fertilizantes no solo também pode aumentar a atividade dos íons hidrogênio, baixando o pH. Alguns fertilizantes nitrogenados contendo amônio ou uréia na composição, quando usados constantemente em solos com baixo poder tampão, mediante a reação de nitrificação, em que o amônio é transformado em nitrato, liberam íons H^+ , reduzindo o pH do solo, de forma a alterar a solubilidade do alumínio, tornando-o tóxico às plantas (CIOTTA et al., 2002). De acordo com o pH da solução do solo, há uma forma predominante de espécie química de alumínio fitotóxico, o Al^{3+} livre na forma monovalente, o polinuclear e o complexado com baixo peso molecular (CARVALHO, 2003). Em pH ácido, menor que 5,0 o alumínio trivalente existe como hexahidrato octaedral, $Al(H_2O)_6^{3+}$ que por convenção é chamado de Al^{3+} . Com o aumento do pH, a forma $Al(H_2O)_6^{3+}$ sofre sucessivas perdas de prótons, ficando na forma $Al(OH)^{2+}$ e $Al(OH)_2^+$. Em pH neutro o alumínio esta na forma de gibsit, $Al(OH)_3$, que é relativamente insolúvel e não é absorvido pelas plantas. Ao atingir o valor em torno de 7,4, pH citoplasmático, o íon predominante é $Al(OH)_4^-$. Quando a atividade total do alumínio é aumentada e a solução é parcialmente neutralizada a forma polinuclear mais comum de Al é $AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}^{7+}$, comumente chamada de “ Al_{13} ” (KOCHAN, 1995).

O desenvolvimento e a produção das plantas de interesse econômico requerem pH do solo dentro de uma determinada faixa que varia com a cultura. O pH adequado para a maioria das culturas se encontra entre 6,0 e 7,0 (VASCONSELOS et al., 2002), onde os teores de Al^{3+} na solução do solo encontram-se baixos ou ate mesmo inexistentes.

Sabe-se que as concentrações de alumínio na solução do solo estão abaixo de $1mg\ L^{-1}$ em pH superior a 5,5, e sua concentração eleva-se de modo marcante em pH baixo (MASCARENHAS, 1995). Em geral, considera-se como prejudicial às plantas o teor de Al trocável acima de $5\ mmol_c\ dm^{-3}$, em solos brasileiros (MALAVOLTA, 1980). Essa toxicidade é, geralmente, o fator mais limitante ao aumento da produtividade das culturas (JUSTINO et al., 2006). Embora pouco se saiba sobre o mecanismo pelo qual o alumínio exerce seus efeitos tóxicos em plantas, o sintoma de toxicidade mais facilmente reconhecido é a inibição do crescimento da raiz, o qual tem se tornado importante indicador do estresse para esse elemento (DELHAIZE & RYAN, 1995). Com isto, a obtenção de cultivares tolerantes à toxicidade de alumínio vem despertando o interesse de muitas áreas da pesquisa,

particularmente quando se pretende explorar eficientemente solos com acidez subsuperficial e elevado teor de alumínio, de difícil correção com manejo químico. Concentrações elevadas de alumínio associadas a períodos de deficiência hídrica reduzem drasticamente a produtividade, inviabilizando, às vezes, o cultivo em áreas de solos ácidos (FREITAS et al., 2006).

A calagem é uma prática cultural que possibilita minimizar este problema o que contribui para elevar o pH, principalmente na camada arável do solo, tornando o Al menos solúvel e, portanto reduzindo sua toxicidade relativa (MARION et al., 1976, CAMARGO et al., 1998). Entretanto, muitas vezes esta prática cultural não é realizada, por não estar ao alcance econômico dos produtores (ZEIGLER et al., 1995). Além disso, dada a dificuldade técnica de se realizar a calagem abaixo da camada arável, o excesso de alumínio trocável torna-se especialmente prejudicial no subsolo, reduzindo a profundidade e a ramificação do sistema radicular, tornando as plantas predispostas a outros tipos de estresse, como, por exemplo, a seca (CAMARGO et al., 1998). Além disso, o efeito danoso do Al^{3+} pode manifestar-se pela limitação do desenvolvimento radicular, bem como interferência na absorção, transporte e utilização de nutrientes, refletindo num declínio da produção (SILVA et al., 1984; BRONDANI & PAIVA, 1996; SILVA, 2002). O excesso de alumínio no solo inibe o crescimento das raízes, afeta a divisão celular, causa precipitação do fósforo tanto no solo como no interior das células (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; SILVA, 2002; JUSTINO et al., 2006).

Vilela & Anglinoni (1994), relatam que a presença de altas concentrações de alumínio tóxico no solo paralisa o crescimento radicular, provocando aumento no diâmetro radicular. Horst et al. (1991), ressaltam que estes efeitos são devido à diminuição dos processos fisiológicos e bioquímicos.

Segundo Jones et al. (1998), a toxicidade do alumínio está ligada a mudanças na homeostase celular do cálcio e no bloqueio de canais na membrana plasmática. O alumínio altera, ainda, a permeabilidade da membrana plasmática. Seus efeitos são causados por mudanças na fluidez dos lipídios, resultantes da ligação eletrostáticas de espécies catiônicas de alumínio a regiões polares dos fosfatidilcolina (RENGEL, 1996; JUSTINO et al., 2006).

Sasaki et al. (1996), verificaram que o alumínio causa severas e irreversíveis mudanças na parede celular, induzindo a lignificação do ápice radicular de trigo,

e assim causando inibição do alongamento celular. Embora as bases celulares e moleculares das diferenças em tolerância do Al ainda não estejam esclarecidas (LARSEN et al., 1998; VASCONSELOS et al., 2002), sabe-se que a região do ápice radicular é o alvo primário da ação tóxica do alumínio.

Foy (1983), descreve que algumas espécies de plantas, baixas doses de alumínio podem ser benéficas ao seu crescimento. Silva (1992) verificou que o crescimento de plantas de arroz foi estimulada pela adição de até 5 mg de $\text{Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$ de solução nutritiva. Já para o milho e, beterraba e algumas espécies de leguminosas tropicais as concentrações de alumínio que resultam em estimulação de crescimento variam entre 71,4 μM e 185 μM , enquanto para plantas de chá, o crescimento é estimulado com 1000 μM (MATSUMOTO et al., 1976). No entanto, a natureza dos efeitos benéficos do alumínio ainda é desconhecida, mas Hung & Bachelard (1993), postularam que esse estímulo ao crescimento ocorre sob condições de estresse ao H^+ , concluindo que o Al^{3+} minimiza a toxicidade do H^+ .

Freire et al. (1987), analisaram o efeito de níveis crescentes de alumínio (0, 0,5, 1, 2, 4, e 8 mg L^{-1}) na capacidade de troca catiônica, no volume e na massa seca de raízes de arroz (IAC-125), em solução nutritiva. Os autores verificaram aumentos de massa seca das raízes e da parte aéreas com doses crescentes de alumínio, tendo sido o máximo obtido com 8 mg L^{-1} . O número de perfilhos não foi afetado pelo alumínio, enquanto o volume de raízes aumentou. Os autores sugerem que o bloqueio de cargas negativas das raízes pelo alumínio ocasionou decréscimo da repulsão aniônica através da parede celular, resultando, indiretamente, em um aumento da atividade de espécies iônicas como H_2PO_4^- e NO_3^- , ao nível de plasmaléma. Além disso, o efeito de cátions bivalentes e trivalentes, sobre a absorção de ânions, principalmente NO_3^- e H_2PO_4^- pode, em parte, explicar efeitos positivos das doses crescentes de alumínio sobre o acúmulo de matéria seca em arroz.

Wheeler et al. (1992), em estudos com ápices radiculares de trigo, não encontraram evidência de dano causado pelo alumínio em cultivares tolerantes. Já nas cultivares sensíveis, após três dias da adição de alumínio, verificaram que células do ápice radicular se tornam entumescidas e extremamente vacuoladas com espessamento da parede celular, sendo que, estas injúrias podem refletir diretamente no crescimento radicular.

Vasconcelos et al. (2002), estudando duas cultivares de arroz (Comum Branco e IAC 899), verificaram decréscimo no alongamento celular com o aumento dos níveis

de alumínio na solução nutritiva. Sivaguru et al. (1992), verificaram que a toxidez de Al^{3+} em arroz, promove reduções na massa seca e no número de raízes, no comprimento e na área radiculares, freqüentemente associados ao aumento do raio médio e volume de raízes. Na parte aérea têm sido descritas reduções na massa seca e na altura de plantas (SIVAGURU & PALIWAL, 1993). Ao comparar esses sintomas como indicador de toxidez para propósitos de avaliação de genótipos, os resultados têm sido diversos. Fageria et al. (1988), concluíram que as massas secas da parte aérea e das raízes foram mais suscetíveis à toxidez de Al^{3+} que a altura da planta e comprimento radicular.

Jean & Petterssom (1989), observaram que a produção relativa da massa seca da parte aérea foi o melhor indicador de sensibilidade de toxidez de alumínio do que a produção relativa de massa seca de raízes ou comprimento radicular relativo. Mendonça (1991), comparando 50 genótipos de arroz de terras altas, concluiu que a produção relativa de matéria seca total e área radicular foram os indicadores mais apropriados para identificar as cultivares mais tolerantes ao alumínio. Embora o arroz seja considerado uma espécie com maior tolerância ao alumínio, existe entre as cultivares ampla variação genotípica (FERREIRA et al., 1995).

Fageira & Santos (1998), avaliaram a resposta do arroz e do feijoeiro em níveis crescentes de alumínio iguais a 0, 0,03, 0,10, 0,23, 1,03 e 3,83 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, em solos ácidos de várzea. A matéria seca e a produção de grãos de arroz aumentaram com o aumento dos níveis de alumínio na solução, ocorrendo o inverso com o feijoeiro. O alumínio diminuiu as concentrações dos nutrientes na parte aérea das plantas de arroz, exceto do zinco e do manganês. A concentração de todos os nutrientes no feijoeiro reduziram com os níveis mais elevados de alumínio. O arroz mostrou-se mais tolerante à toxidez de alumínio que o feijoeiro.

Segundo Ganesan et al. (1993), cultivares de arroz tolerantes ao alumínio apresentam maior capacidade para elevar o pH da solução nutritiva, além de melhor eficiência de metabolizar o nitrato (NO_3^-) na presença do Al^{3+} . Cambraia et al. (1987), observaram em sorgo, na presença de alumínio, que as plantas diminuíram o pH do meio, e o efeito foi mais intenso nas soluções nutritivas em que a proporção $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ decresceu. Mendonças et al. (2005), trabalhando com duas cultivares de arroz em solução nutritiva na presença de alumínio, verificaram que a cultivar Fernandes (tolerante) apresentou maior eficiência no controle de pH, de modo a absorver menos Al^{3+} , e tolerar mais a presença desse

cátion na solução, do que a Maravilha (sensível).

Para Malkanthi et al. (1995), a tolerância ao alumínio é atribuída à capacidade das plantas em manterem em suas raízes ou na parte aérea níveis adequados de certos macronutrientes e micronutrientes essenciais. Em arroz, este tipo de correlação tem sido observado em diferentes cultivares. Para Sivaguru & Paliwal (1993), cultivares de arroz tolerantes ao alumínio apresentam teores de P e Ca mais elevados do que as cultivares sensíveis. Furlani & Furlani (1991), relatam que tal fato pode ser apenas resultado de maior crescimento e aprofundamento dos sistemas radiculares das cultivares tolerantes, que exploram maior volume de solo, e não em razão de um aumento na eficiência de absorção e uso desses nutrientes. Para Rosolem (1995), o alongamento radicular em solos ácidos tem importância secundária na absorção de nutrientes, uma vez que, a disponibilidade de nutrientes em profundidade, via de regra é baixa. Desta forma, a maior importância de um sistema radicular profundo reside fundamentalmente na aquisição de água pelas plantas.

Segundo Teo et al. (1995), a eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas pode ser melhorada através da seleção de cultivares com maior superfície radicular. Plantas com estas características possuem maior capacidade de absorção de nutrientes do solo. Vários autores relatam que a capacidade de absorção de nutrientes está relacionada com o comprimento radicular (BARBER, 1984; TEO et al., 1995). No entanto, alguns nutrientes se movimentam com relativa liberdade em solos úmidos, como o nitrogênio na forma de NO_3^- . Neste caso torna-se pouco importante a proximidade da área de superfície radicular para absorção do nutriente. Porém, para nutrientes com baixas taxas de difusão no solo, como o fósforo, a proximidade entre a superfície de absorção da raiz e o nutriente é muito importante (HARPER et al., 1991; ROSOLEM, 1995).

Freitas et al. (2006), estudaram a tolerância de 16 genótipos de arroz ao alumínio, e sugeriram que é possível selecionar plantas tolerantes com maior absorção de P, Mg, Ca e K indiretamente pelo desenvolvimento radicular, pois, a presença de alumínio debilitou e reduziu o crescimento das raízes, interferindo na absorção de nutrientes.

Já Sivaguru & Paliwal (1993), indicam que além da capacidade de manter teores elevados de certos íons, algumas cultivares de arroz tolerantes ao alumínio apresentam maior eficiência na absorção e na utilização desses elementos, sob condições de estresse. Mendonça et al. (2003), avaliando em solução nutritiva duas cultivares de arroz,

observaram que a cultivar Fernandes tolerante a toxidez de Al^{3+} apresentou maior eficiência de utilização de P, K, Ca e Mg em comparação com a cultivar Maravilha, que é sensível.

Embora sejam conhecidos alguns cultivares de arroz tolerantes ao alumínio, novos materiais são lançados periodicamente, fazendo necessário a repetições desses estudos. Além disso, os mecanismos e os principais fatores que afetam essa tolerância, ainda não foram esclarecidos. Contudo, não há consenso entre os pesquisadores acerca dos parâmetros mais adequados para indicar as diferenças varietais sobre tolerância ao alumínio em arroz, justificando a realização de mais estudos que correlacionem o desenvolvimento radicular e aéreo na presença de alumínio, bem como seus efeitos na nutrição de plantas de arroz cultivadas em solos ácidos, como os do cerrado brasileiro.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização do experimento

O experimento foi desenvolvido em solução nutritiva, em casa-de-vegetação da Faculdade de Ciências Agronômicas FCA-UNESP, Câmpus de Botucatu - SP, no Departamento de Produção Vegetal, setor de Agricultura, nos meses de junho a outubro de 2005.

5.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, disposto em modelo fatorial 3x4, sendo três cultivares arroz de terras altas (BRS Talento,

Caiapó e Primavera) e quatro níveis de alumínio (0, 10, 20 e 40 mg L⁻¹), com quatro repetições, totalizando 48 unidades experimentais.

5.3. Descrição dos cultivares

5.3.1. BRS Talento

O cultivar BRS Talento foi lançado em 2002, é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa Arroz e Feijão - EMBRAPA, resultado da seleção de uma população F₃ (CT11257-7-2-M-M) X (Caroline X BG 402 X CR1113 X CAROLINE 1). Apresenta porte baixo (85 - 105 cm), ciclo semiprecoce (110 dias), 82 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino, moderadamente resistente a brusone e resistência ao acamamento, pertencente ao grupo moderno (EMBRAPA, 2006). As plantas do grupo moderno possuem, em geral, porte baixo ou semi-anã, com altura inferiores a 100 cm, alta capacidade de afilhamento, folhas curtas, eretas e pilosas, colmos fortes, exigentes quanto ao preparo do solo, tratos culturais e fertilidade do solo, e tolerantes a níveis elevado de adubações nitrogenadas sem acamar, o que associa a bons índices de produtividades de grão (TERRES et al., 2004), são cultivares sensível a déficit hídrico e exigem bons manejo com a água (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI 1993).

5.3.2. Caiapó

O cultivar Caiapó foi lançado em 1994, é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa Arroz e Feijão - EMBRAPA, resultado do cruzamento (IRAT 13 X Beira Campo) X (CNA X 104-B18Py-2B X Pérola). Apresenta porte médio (110 – 130 cm), ciclo médio (128 dias), 95 a 100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo,

moderadamente suscetível á brusone e ao acamamento, pertencente ao grupo tradicional (SOARES et al., 1993). As plantas do grupo tradicional possuem, em geral, estruturas superiores a 105 cm de altura, baixos índice de afilhamento, folhas longas pendentes e pílulas, são rústicas e, foram selecionadas para tolerar a seca, apresentam estabilidade de produção e tolerantes a solos com baixos níveis de fertilidade (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI 1993; TERRES et al., 2004).

5.3.3. Primavera

O cultivar Primavera foi lançado em 1997, é proveniente do Centro Nacional de Pesquisa Arroz e Feijão - EMBRAPA, resultado do cruzamento IRAT 10 X LS 85-158. Apresenta como características porte médio (100-120 cm), ciclo curto (112 dias), 80 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (agulhinha) moderadamente sucessível a brusone e ao acamamento, pertencente ao grupo intermediário (BRESEGHELLO et al., 1998). As plantas do grupo intermediário possuem, em geral, porte intermediário, isto é, ao redor de 100 cm, as folhas curtas, estreitas, semi eretas e lisas, e média capacidade de perfilhamento, possuem baixo vigor inicial, e são cultivares exigentes quanto ao preparo de solo e tratos culturais, média tolerância à seca e fertilidade do solo (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI 1993).

5.4. Instalação e condução do experimento

Para instalação do experimento, as sementes de arroz foram tratadas com Carboxim + Thiram na dose de 300 ml 100 kg⁻¹ de sementes do produto comercial. Este material foi acomodado em germinador à temperatura 25°C. Após 48 h, quando foi observado o início da emergência da radícula, as sementes foram semeadas a lanço em vasos plásticos

contendo areia lavada e desinfetada, em seguida transferidos para casa de vegetação de vidro, com temperatura e umidade controladas.

Aos 20 dias após a emergência (DAE) as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade de forma e tamanho, e transferidas para vasos plásticos pretos, contendo 20 L de solução nutritiva descrita por Furlani & Furlani (1988), à meia força iônica. As tampas utilizadas foram confeccionadas a partir de placas de isopor que foram perfuradas para acoplar seis plantas por vaso, presas por pedaços de espuma, possibilitando as raízes entrar em contato com a solução nutritiva.

Aos 27 DAE a solução foi trocada por uma de força total (FURLANI & FURLANI, 1988) e aplicados os tratamentos de alumínio, sob a forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Durante todo o período a solução nutritiva foi aerada e o pH monitorado diariamente, mantendo-o em torno de 4,0, utilizando-se para sua correção NaOH a $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ e HCl a $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$.

A solução nutritiva foi renovada semanalmente, e as perdas por evapotranspiração foram repostas diariamente com água desmineralizada e deionizada. O controle do pH da solução foi feito com a utilização de um medidor de pH Digimed DMPH-3.

O pH da solução nutritiva tanto na presença como na ausência de alumínio foi ajustado para $4,0 \pm 0,2$. De acordo com a necessidade, o pH foi ajustado com HCl e NaOH.

Aos 60 DAE, quando a maioria das plantas encontrava-se no estágio de diferenciação floral foi realizada a colheita do experimento.

As plantas foram seccionadas no colo, separando-se a parte aérea do sistema radicular.

As soluções estoques, soluções nutritivas básicas, e os níveis de alumínio que foram submetidas às plantas de arroz encontram-se na tabela 1 e 2.

Tabela 1. Composição da solução nutritiva (FURLANI & FURLANI, 1988).

Nº.	Componentes	Concentração g L ⁻¹	Relação estoque/solução ml L ⁻¹
1	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O.	236	2,0
2	CaCl ₂ anidro ⁽¹⁾	111	0,3
3	K ₂ SO ₄	174	0,1
4	MgSO ₄ .7H ₂ O	246	0,5
5	KH ₂ PO ₄	136	0,2
6	KNO ₃	101	0,9
7	MnCl ₂ .4H ₂ O	1,81	-
8	H ₃ BO ₃	2,86	-
9	ZnCl ₂	0,1	-
10	CuCl ₂	0,04	-
11	H ₂ MoO ₄ .H ₂ O	0,02	-
12	FeSO ₄ .7H ₂ O	0,01	-
13	Fe-EDTA	0,01	1,6
Tratamento			
0,0	AlCl ₃ .6H ₂ O	0,00	0,00
10,0	AlCl ₃ .6H ₂ O	241,50	98,79
20,0	AlCl ₃ .6H ₂ O	241,50	148,19
40,0	AlCl ₃ .6H ₂ O	241,50	197,58

⁽¹⁾ A solução de CaCl₂ foi preparada a partir de CaCO₃ p.a.: umedecer 81,87g de CaCO₃ com água destilada, dissolver com 123 ml de HCl fumegante e completar o volume para 1 litro. Se a solução ficar turva, adicionar mais algumas gotas de HCl (antes de completar o volume) até a dissolução completa.

Tabela 2. Composição final da solução nutritiva (FURLANI & FURLANI, 1988).

Nutrientes	Concentração (mg L ⁻¹)
N-NO ₃ ⁻	77,4
N-NH ₄ ⁺	9,0
Ca	90,0
K	49,0
Mg	12,0
P	6,6
S	18,5
Cl	21,3
Fe	5,0
Mn	0,5
B	0,5
Zn	0,05
Cu	0,02
Mo	0,001

5.5. Avaliações

5.5.1. Comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular

Na colheita do experimento, as raízes foram separadas da parte aérea e lavadas em água corrente sobre peneiras com malha de 0,5 mm. Do material lavado e separado foi tomada uma amostra de aproximadamente 30% do sistema radicular, sendo acondicionado em coletor universal, com solução de 30% de álcool + 70% de água comum, e em seguida levado à geladeira à temperatura de 4⁰C, onde foi mantida até o momento da avaliação.

As avaliações de comprimento (m planta⁻¹), área de superfície (cm² planta⁻¹), volume (cm³ planta⁻¹) e o diâmetro médio (mm) radicular foram realizadas por meio de digitalização de imagens em scanner tridimensional, desenvolvido para este fim, acoplado a um computador dotado do Software WinRhizo versão 3.2, que utiliza como princípio a metodologia proposta por Tennant (1975).

5.5.2. Altura da planta

A altura da planta foi determinada, medindo-se à distância entre o colo da planta até a extremidade superior da folha mais alta, no momento da colheita. Sendo representada pela média de seis plantas do vaso.

5.5.3. Número de perfilhos por planta

O número de perfilhos por planta foi determinado na colheita do experimento, em razão da contagem do número de perfilhos por planta, considerando-se a média de quatro plantas por unidade experimental.

5.5.4. Produção de matéria seca e teores de nutrientes do sistema radicular e da parte aérea

O sistema radicular e a parte aérea das plantas após lavagem foram secas separadamente em estufa com circulação forçada de ar, a 65⁰C até peso constante. Posteriormente determinou-se a matéria seca, e as amostras de raízes e da parte aérea foram moídas e avaliadas quimicamente para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

5.5.5. Quantidade acumulada de nutrientes na raiz, parte aérea e absorvida por metro de raiz

Através dos dados de produção de matéria seca e dos teores de nutrientes da raiz e da parte aérea, determinou-se a quantidade acumulada de nutrientes no sistema radicular e na parte aérea pela multiplicação dos valores de teores pelos valores de matéria seca. De posse dos resultados de acúmulo de nutriente na parte aérea, realizou-se a determinação das quantidades de nutrientes absorvidas por metro de raiz, através da razão: quantidade acumulada de nutrientes na parte aérea/comprimento radicular.

5. 6. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias de cultivares comparadas pelo teste Tukey a 5%. Para doses de alumínio e para o desdobramento da interação doses de alumínio dentro de cultivares adotaram a análise de regressão, sendo que a equação mais adequada foi definida da seguinte forma: primeiro pelo modelo, com efeito significativo, e segundo pelo ajuste através do maior valor do coeficiente de determinação (R^2).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Crescimento radicular e produção de matéria seca da raiz

Na Tabela 3 estão contidos os resultados da análise de variância referentes as variáveis do sistema radicular. Pode-se constatar efeito significativo de cultivares, dos níveis de alumínio e da interação entre os fatores para todas as variáveis.

Nas Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 estão os desdobramento das interações, dos níveis de alumínio dentro de cultivares, para comprimento, área de superfície, volume, diâmetro médio e matéria seca radicular. Para a variável comprimento radicular, notou-se que para todas as cultivares houve efeito quadrático da aplicação alumínio (Figura 1). Na ausência do Al^{3+} os maiores valores de comprimento radicular foram verificados na cultivar BRS Talento. No entanto, sob baixos níveis de alumínio as cultivares apresentaram aumento no comprimento radicular até a dose aproximada de 9,5, 18,5 e 21,0 mg L⁻¹, respectivamente, para BRS Talento, Primavera e Caiapó. Esse resultado está relacionado à características genéticas, pois, a cultivar do grupo moderno BRS Talento apresentou comprimento radicular muito

desenvolvido na ausência de Al^{3+} , sendo que, a mesma foi selecionada para sistemas de produção de solos corrigidos.

Tabela 3. Valores médios de comprimento, área de superfície, volume, diâmetro médio e matéria seca do sistema radicular, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivar	Sistema radicular				
	Comprimento (m planta ⁻¹)	Área (cm ² planta ⁻¹)	Volume (cm ³ planta ⁻¹)	Diâmetro (mm)	Matéria seca (g planta ⁻¹)
BRS Talento	42,49a	521,25ab	165,91ab	0,03b	0,63ab
Caiapó	29,43c	463,36b	146,91b	0,04a	0,58b
Primavera	34,82b	552,80a	175,96a	0,04a	0,72a
----- Valor de F -----					
Cultivar (C)	18,01**	3,50*	3,88*	46,27**	5,47**
Dose de alumínio (Al^{3+})	33,54**	19,90**	20,51**	9,31**	20,47**
C x Al^{3+}	8,20**	4,19**	4,29**	33,73**	2,72*
----- Valor de F para análise de regressão do fator alumínio -----					
R.L.	19,94**	20,29**	21,15**	0,06 ^{ns}	17,17**
R.Q.	72,56**	35,66**	36,79**	25,56**	40,23**
Cultivar BRS Talento					
R.L.	41,83**	30,05**	31,08**	1,07 ^{ns}	18,41**
R.Q.	11,86**	4,72*	4,88*	0,16 ^{ns}	2,93 ^{ns}
Cultivar Caiapó					
R.L.	4,87*	6,35*	6,72*	0,17 ^{ns}	7,23*
R.Q.	34,24**	15,75**	16,19**	37,14**	18,57**
Cultivar Primavera					
R.L.	0,88 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,04 ^{ns}
R.Q.	29,78**	17,64**	18,24**	3,80*	24,61**
C.V. (%)	17,38	18,91	18,63	7,46	17,83

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente.

Em contrapartida, as cultivares Caiapó e Primavera, pertencentes aos grupos tradicional e intermediário, respectivamente, tiveram incremento no comprimento radicular sob baixos níveis de alumínio, mostrando ser mais adaptadas a solos ácidos do que a

cultivar BRS Talento. Desta forma pode-se inferir que a cultivar BRS Talento apresenta baixa tolerância ao alumínio, uma vez que, a partir de $9,5 \text{ mg L}^{-1}$ de Al^{3+} houve redução significativa do comprimento radicular, enquanto que as cultivares do grupo intermediário e tradicional apresentaram melhores resultados em crescimento das raízes na presença de alumínio, e consequentemente são mais tolerantes a Al^{3+} (Figura 1).

Comparando-se o máximo crescimento radicular das cultivares até ao nível 40 mg L^{-1} de Al^{3+} , observa-se redução em 55, 35 e 58% no crescimento das raízes, respectivamente, para BRS Talento, Primavera e Caiapó (Figura 1). Vários trabalhos demonstraram reduções no comprimento radicular com o aumento dos níveis de alumínio na solução (FREIRE et al., 1987; DELHAIZE & RYAN, 1995; MENDONÇA, 2005).

Os aumentos do crescimento radicular em baixos níveis de alumínio podem estar relacionados a sua neutralização dentro da planta. O Al pode ter sido complexado por ácidos orgânicos (KOCHIAN, 1995) e mantido inativo no citoplasma, nos vacúolos (TAYLOR, 1988), ou nas interações com calmodulina (SUHAYDA & HAUNG, 1985), prevenindo os seus efeitos negativos nos processos metabólicos. Vários autores verificaram o efeito benéfico de baixos níveis de alumínio sobre o crescimento radicular em algumas espécies, com destaque para, goiabeira (SALVADOR et al., 2000), pimenta do reino (VELOSO et al., 2000) e arroz (MACEDO et al., 1997; VICENTE et al., 1998; VASCONCELOS, et al., 2002).

Quanto à área de superfície e volume radicular (Figuras 2 e 3) as cultivares de arroz apresentaram comportamento semelhante ao constatado para comprimento radicular. Assim, na ausência do Al^{3+} os maiores valores de área de superfície e volume radicular foram verificados na BRS Talento. Sob baixos níveis de alumínio as cultivares apresentaram aumento na superfície e no volume radicular até aproximadamente 5,6, 16,9 e $21,1 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente, para BRS Talento, Primavera e Caiapó. A resposta do aumento da superfície e do volume radicular sob baixos níveis de alumínio está, diretamente relacionado com o incremento do comprimento radicular (Figura 1).

Através das equações (Figura 4), notou-se que o diâmetro médio radicular das cultivares Caiapó e Primavera apresentaram resposta negativa e quadrática aos níveis de alumínio, reduzindo o diâmetro médio até a dose aproximada de 20 mg L^{-1} . Acima desta concentração houve aumento nos valores, o que pode ser decorrente do mecanismo de

tolerância ao Al^{3+} desenvolvido pelas cultivares. Já na BRS Talento os níveis de alumínio não afetaram o diâmetro médio radicular, apresentando o menor valor em relação às demais cultivares.

Na variável matéria seca do sistema radicular (Figura 5), constatou-se que as cultivares apresentaram comportamento semelhante aos verificados para comprimento, área de superfície e volume radicular (Figuras 1, 2 e 3), apresentando incremento na matéria seca das raízes até a dose 20,68, 17,00 e 5,33 mg L^{-1} , respectivamente para Primavera, Caiápo e BRS Talento. Esses resultados estão diretamente relacionadas com o aumento do comprimento, área de superfície e volume radiculares (Figuras 1, 2 e 3). Estes dados corroboram com os resultados obtidos por Macedo et al. (1997), Vicente et al. (1998), Veloso et al. (2000), Vasconcelos, et al. (2002) e Carvalho (2003).

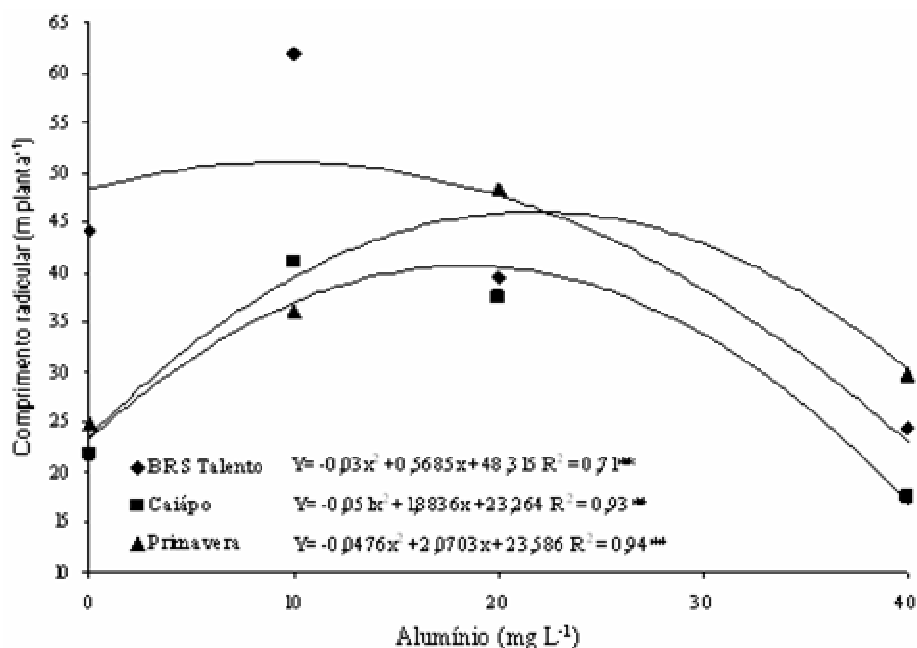


Figura 1. Comprimento radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

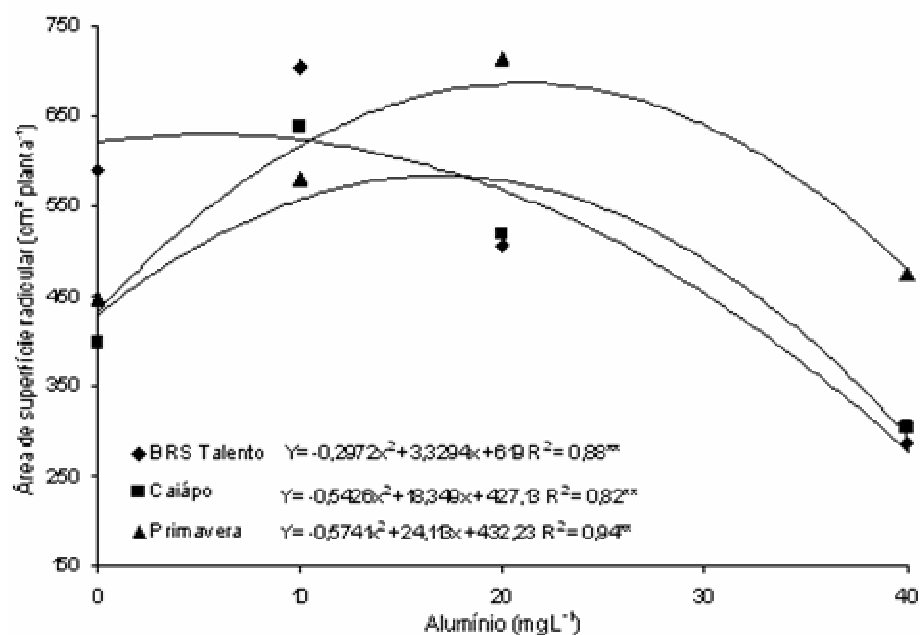


Figura 2. Área de superfície radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

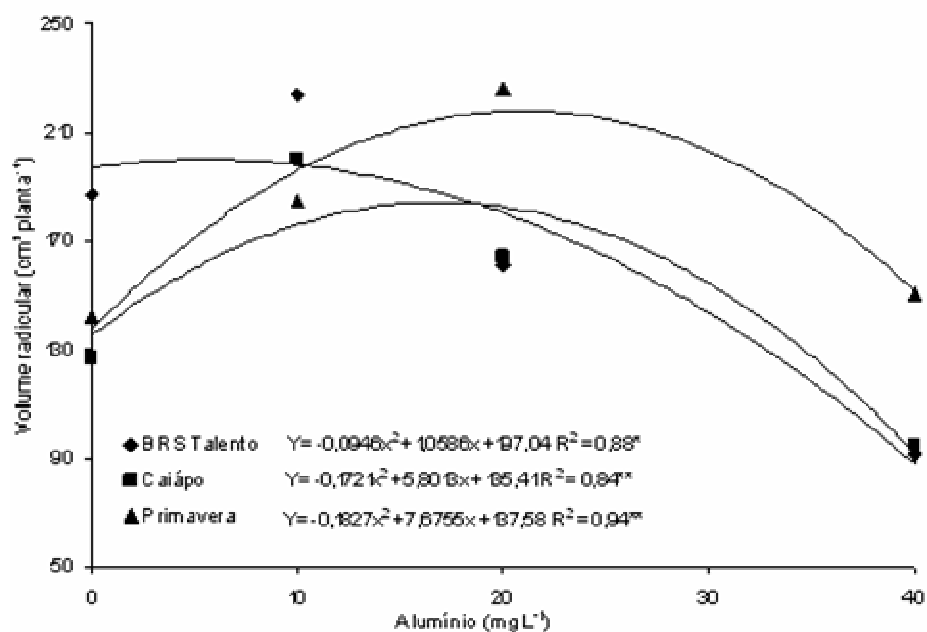


Figura 3. Volume radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

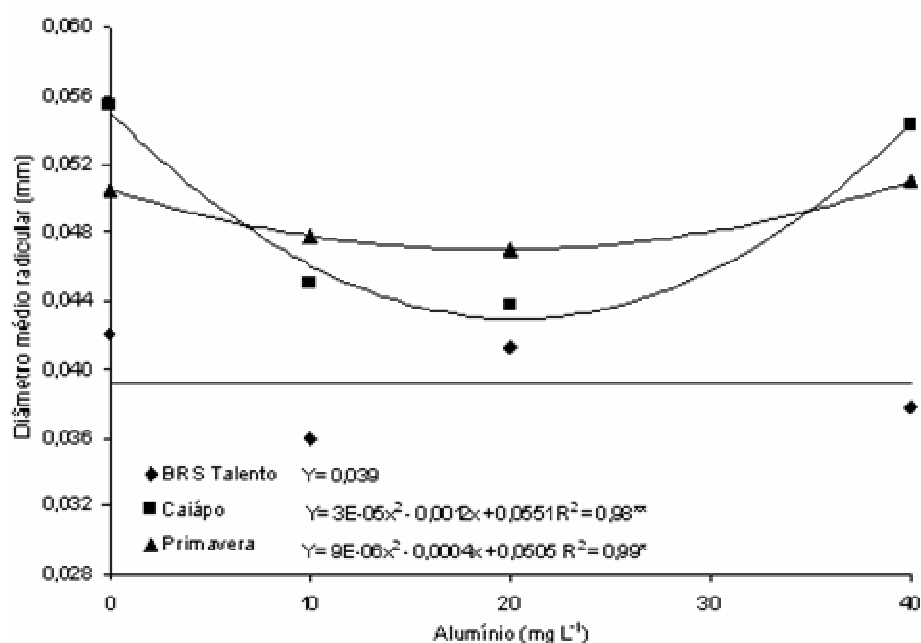


Figura 4. Diâmetro médio radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

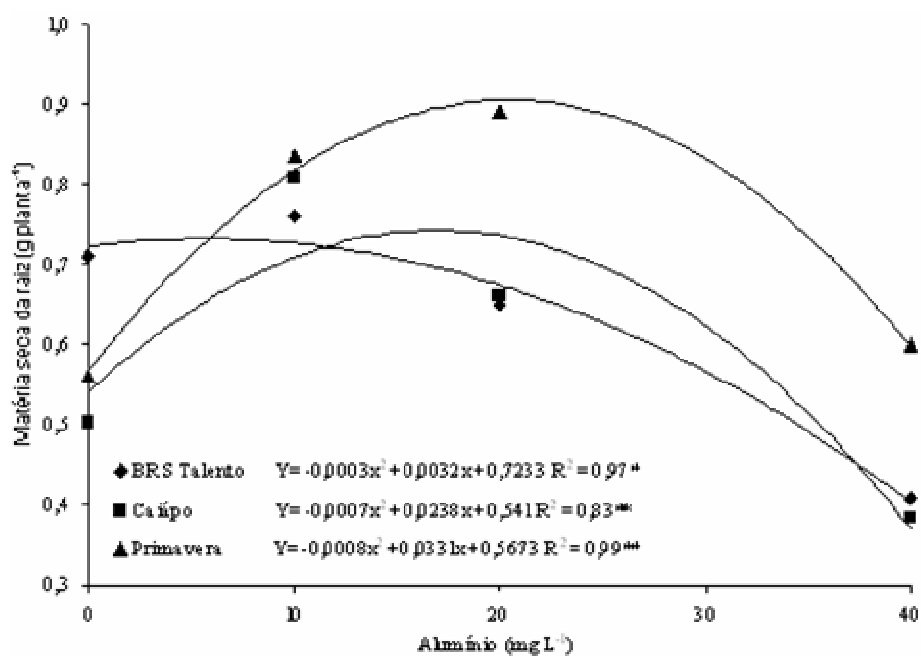


Figura 5. Matéria seca radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

O aumento do comprimento radicular em baixos níveis de alumínio provocou, conseqüentemente incremento na área de superfície e volume radicular das cultivares de arroz torna-se interessante, uma vez que, com maior área de superfície de contato, as raízes têm melhores condições de absorção de nutrientes na solução de forma mais eficiente (Figuras 1, 2, 3 e 5).

Embora o alumínio não seja considerado um elemento essencial para as plantas, e ainda se desconheçam os mecanismos pelos quais em baixas concentrações ele possa, algumas vezes, induzir aumento no crescimento, superfície, volume radicular ou produzir outros efeitos desejáveis. Foy (1974) discute várias hipóteses de explicação do fato: o aumento na disponibilidade do ferro através da hidrólise do Al^{3+} e diminuição do pH, correção ou prevenção de deficiência de ferro pela liberação do ferro adsorvido em sítios metabólicos inativos dentro da planta, bloqueio dos sítios da parede celular carregados negativamente promovendo a absorção de fósforo, retardamento da deterioração das raízes em baixas concentrações de cálcio pelo crescimento lento, correção ou prevenção do efeito de concentrações excessivas de fósforo, prevenção de toxicidade de cobre e manganês e redução do crescimento indesejável do topo da planta ricas em nitrogênio.

Analizando os resultados de comprimento, superfície, volume, diâmetro e matéria seca radicular (Figuras 1, 2, 3, 4 e 5), pode se inferir que a cultivar Primavera do grupo intermediário apresentou maior tolerância ao alumínio, sendo que, a BRS Talento é mais sensível a este elemento. Isto se deve ao melhoramento genético que passou a cultivar do grupo moderno visando melhor arquitetura da planta e maior capacidade produtiva de grãos, em solos com boa fertilidade.

6.2. Produções de matéria seca da parte aérea, total, número de perfilhos e altura de planta

Na Tabela 4 estão contidos os resultados da análise de variância da matéria seca da parte aérea, matéria seca total, números de perfilhos por planta e altura de plantas. Constata-se que as cultivares apresentaram diferenças significativas em todas as

variáveis avaliadas. Os níveis de alumínio afetaram todas as variáveis estudadas, contudo, somente a variável altura de planta não foi influenciada pela interação entre os fatores.

Tabela 4. Valores médios de matéria seca da parte aérea, matéria seca total e números de perfilhos por planta e altura de plantas, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivar	Matéria seca		Perfilhos	Altura planta
	Parte aérea	Total		
	----- (g planta ⁻¹) -----		nº.	----- cm -----
BRS Talento	2,33b	2,96b	12,25a	46,66b
Caiapó	2,57b	3,16b	7,98c	65,34a
Primavera	3,27a	3,99a	9,81b	67,54a
----- Valor de F -----				
Cultivar (C)	13,91**	12,60**	49,18**	129,13**
Dose de alumínio (Al ³⁺)	39,88**	38,60**	40,08**	52,08**
C x Al ³⁺	2,72*	2,74*	4,42**	1,23 ^{ns}
----- Valor de F para análise de regressão do fator alumínio -----				
R.L.	24,79**	25,15**	68,97**	27,72**
R.Q.	92,62**	87,93**	49,59**	111,25**
Cultivar BRS Talento				
R.L.	9,97**	12,22**	56,59**	8,42**
R.Q.	7,67**	7,17**	17,58**	18,05**
Cultivar Caiapó				
R.L.	8,67**	9,06**	5,57*	8,14**
R.Q.	37,31**	36,07**	7,35*	38,67**
Cultivar Primavera				
R.L.	6,35**	4,75**	20,20**	11,84**
R.Q.	60,68**	57,12**	28,00**	62,74**
C.V. (%)	19,15	18,20	12,20	6,74

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente.

Nas Figuras 6, 7, e 8 estão os desdobramentos das interações, níveis de alumínio dentro de cultivares, para de matéria seca da parte aérea e matéria seca total, números de perfilhos por planta e altura de plantas.

Mediante as equações (Figuras 6 e 7) notou-se que as cultivares apresentaram o mesmo comportamento para matéria seca da parte aérea e matéria seca total, com os dados ajustados à funções quadráticas. Na ausência do alumínio a cultivar BRS Talento apresentou a maior produção de matéria seca da parte aérea e matéria seca total, com 2,41 e 3,13 g planta⁻¹, respectivamente, sendo que, os menores valores foram registrados na Caiapó. Sob baixos níveis de alumínio as cultivares apresentaram aumento na produção de matéria seca da parte aérea e na matéria seca total até aproximadamente 14,00, 17,80 e 19,45 mg L⁻¹, respectivamente, para BRS Talento, Primavera e Caiapó.

O aumento nos valores de produção de matéria seca da parte aérea e matéria seca total sob baixas doses de alumínio está diretamente relacionado com o crescimento radicular (Figuras 1, 2, 3 e 5), uma vez que, com o maior desenvolvimento das raízes, provavelmente, ocorreram incrementos na absorção de nutrientes, acarretando em maior desenvolvimento da parte aérea. A cultivar Primavera apresentou as maiores produções de matéria seca da parte aérea e matéria seca total na presença de 17,8 mg L⁻¹ de alumínio, com ganho de 4,8 e 5,7g planta⁻¹, respectivamente, sendo que os menores valores foram verificados na BRS Talento.

Os resultados obtidos corroboram com os verificados por Silva (1992), que também constatou efeito positivo na matéria seca da parte aérea e total para os níveis de 10 e 20 mg L⁻¹ e negativo para 40 mg L⁻¹ na cultura do arroz. Resultados semelhantes foram obtidos por Macedo et al. (1997) e Vicente et al. (1998). As possíveis explicações para os efeitos negativos provocados pelo excesso de alumínio seriam atribuídas diretamente às deficiências de fósforo induzidas pelo Al³⁺. Assim, o fósforo ficaria retido nas raízes e quase não se movimentaria para a parte aérea da planta, podendo haver precipitação do P pelo Al³⁺, dando produtos de baixa solubilidade no meio, na superfície das raízes, em espaços intercelulares e nos tecidos condutores (FOY, 1974; MALAVOLTA, 1980).

Quanto aos números de perfilhos planta⁻¹ (Figura 8), notou-se que todas às cultivares apresentaram respostas positivas e quadráticas ao aumento das doses de alumínio. Na ausência do alumínio, a BRS Talento apresentou os maiores valores, sendo que o

menor valor foi constatado na Caiapó. Com o aumento das doses de alumínio a cultivar BRS Talento foi a que apresentou os melhores resultados até a dose de 10 mg L⁻¹. Estes resultados apresentados pelas cultivares estão diretamente relacionados às características genéticas. Cultivar do grupo moderno como a BRS Talento passaram por melhoramento genético visando maior capacidade de perfilhamento e melhor arquitetura da planta (BRESEGHELLO et al., 1998; EMBRAPA, 2001).

Redução no perfilhamento de gramíneas em decorrência do excesso de alumínio é descrita na literatura. Fernandez et al. (1984), verificaram que a adição de 6 mg L⁻¹ de Al³⁺ na solução nutritiva reduziu em aproximadamente 50% o perfilhamento da forrageira *Brachiaria decumbens* em relação à testemunha. Já Silva (1997), verificou que as plantas de *Panicum maximum* foram severamente afetadas pela adição de alumínio na solução nutritiva, visto que o perfilhamento foi reduzido em 50% e 77% nas doses 6 e 12 L⁻¹ mg de Al³⁺, respectivamente, em relação à dose de 0 L⁻¹ mg de Al³⁺.

Assim, o alumínio proporcionou aumentos significativos na variável altura de plantas na cultivares, que responderam de forma positiva e quadrática às doses de Al³⁺, atingindo o valor máximo na dose aproximada de 17,71 mg Al³⁺ L⁻¹ na solução. (Figura 9). A Caiapó obteve o maior valor de altura de planta seguida pela Primavera, bem como, o menor valor foi observado na BRS Talento. As diferenças em altura de plantas observada nas cultivares estão diretamente relacionadas às características genéticas. Pois, cultivares do grupo tradicional como a Caiapó apresentam plantas com altura elevada, raízes profundas, baixo perfilhamento e tolerância a solos com baixos níveis de fertilidade (BRESEGHELLO et al., 1998; PINHEIRO, 1999). O efeito verificado na altura de plantas de arroz sob baixas doses de alumínio (Figura 9), foram também evidenciados por Macedo et al., (1997) e Vicente et al., (1998). Efeito positivo do Al³⁺ em baixas concentrações na solução, talvez possa ser explicado pelos mecanismos fisiológicos de tolerância ao alumínio que ainda não estão bem esclarecidos (CARVALHO, 2003). Esses autores registraram que plantas tolerantes ao alumínio aumentam o pH da solução nutritiva, provavelmente por absorver pequena quantidade de amônio, tendo preferência pelo nitrato. Em decorrência disso, aumentaria o pH próximo das raízes, diminuindo a solubilidade e a toxidez do alumínio. Estes fatos também foram evidenciados nos estudos de Freire et al. (1987), Furlani & Furlani (1988), Mendonça et al. (2005) e Justino et al (2006), em arroz.

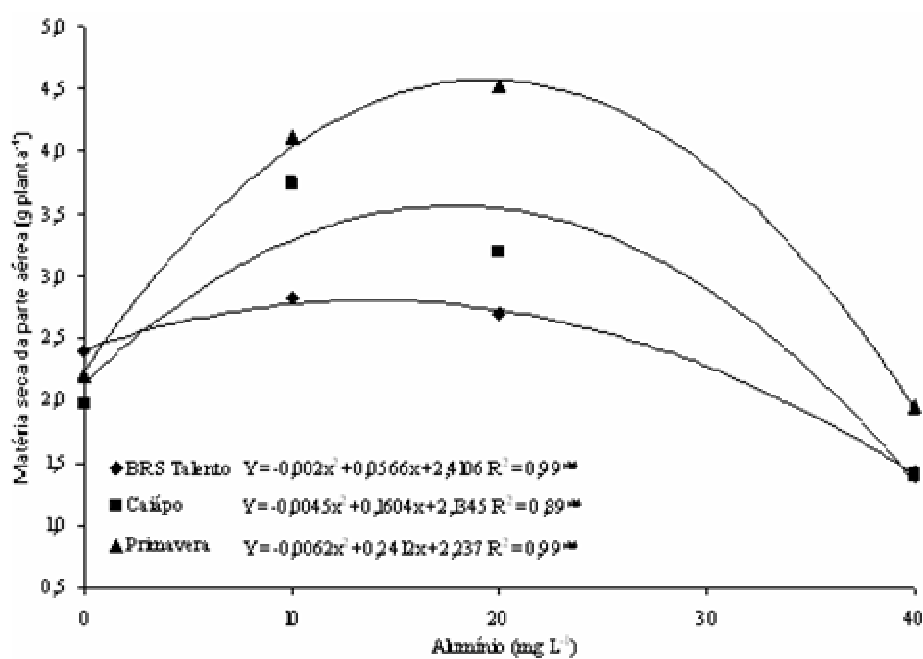


Figura 6. Matéria da seca parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

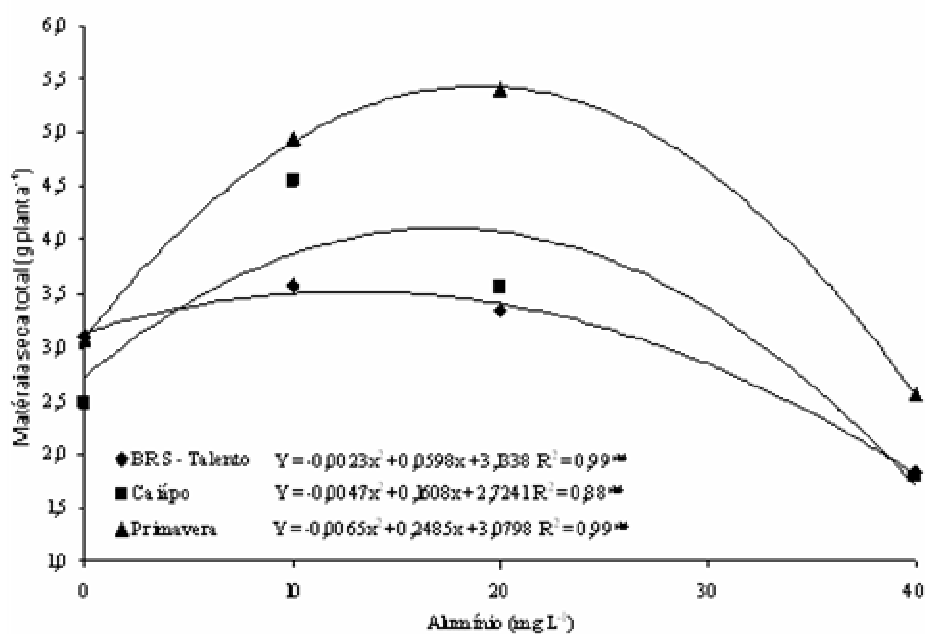


Figura 7. Matéria seca total de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

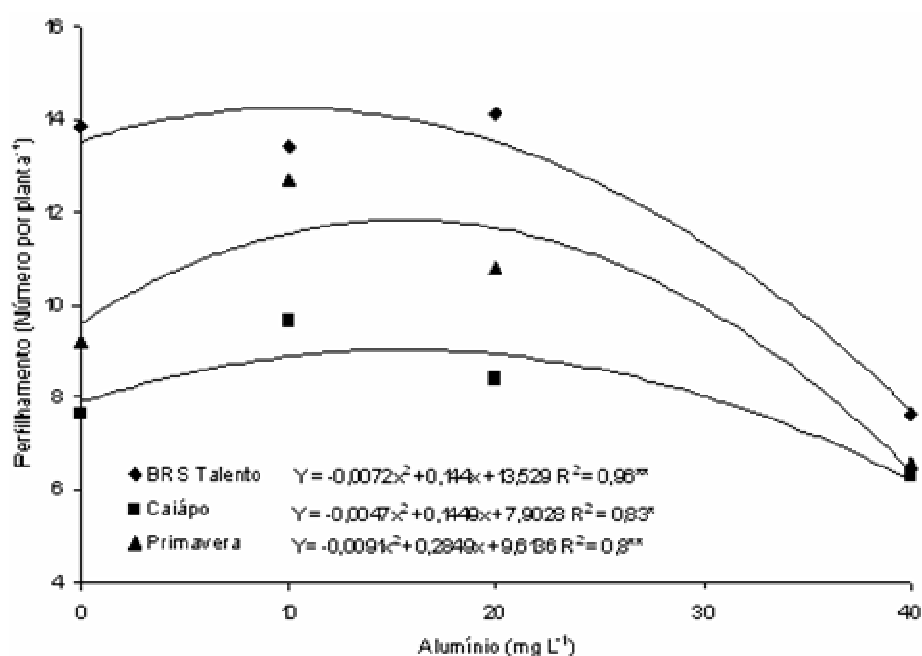


Figura 8. Números de perfilhos por planta em cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

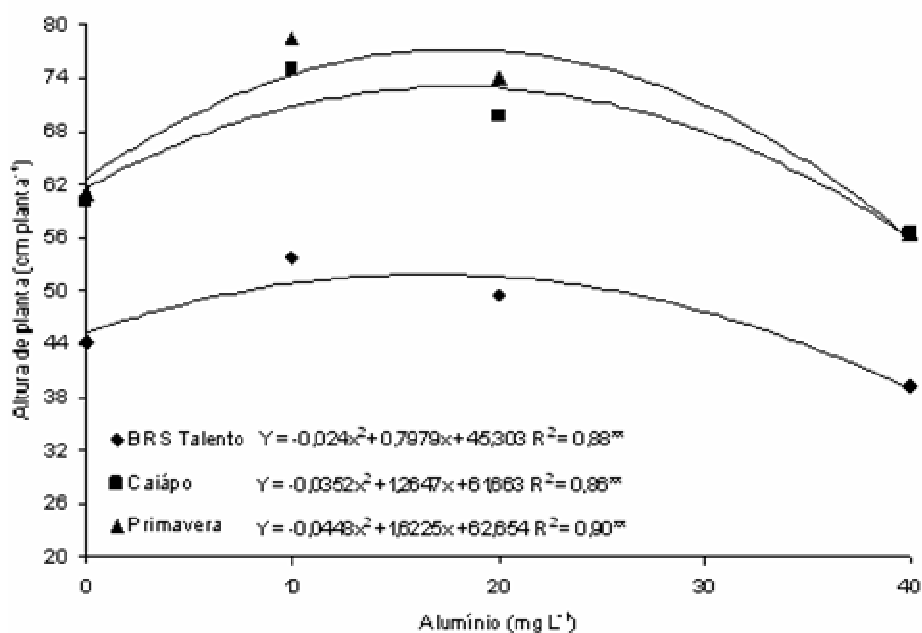


Figura 9. Altura da planta de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Com o aumento dos níveis de alumínio, as cultivares Primavera e Caiapó do grupo intermediário e tradicional, respectivamente, apresentaram maior acúmulo de matéria seca da parte aérea e matéria seca total, entretanto, na ausência de alumínio a BRS Talento do grupo moderno apresentou as maiores respostas (Figuras 5, 6 e 7). Estes resultados podem estar relacionados à características genéticas das cultivares.

De maneira geral as cultivares de arroz apresentaram incremento no seu desenvolvimento sob baixas doses de alumínio, ou seja, o Al^{3+} em níveis considerados tóxicos para outras culturas agrícolas favoreceu o crescimento do arroz, com expressivo destaque para a Primavera do grupo intermediário (Figuras 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9).

6.3. Teores de nutrientes na raiz e na parte aérea

Na Tabela 5 estão contidos os resultados da análise de variância para os teores de nutrientes no sistema radicular. Verificou-se que houve efeito significativo de cultivares para os teores de nutrientes, exceção para o Cu e Mn. Notou-se ainda efeitos significativos para os níveis de alumínio e da interação entre os fatores para todos os nutrientes.

Quanto aos teores de nutrientes na matéria seca da parte aérea, os resultados estão contidos na Tabela 6. Constatou-se que houve efeito significativo de cultivares para todos os nutrientes, exceto para o Fe. Verificou-se ainda efeito significativo para os níveis de alumínio e para a interação entre os fatores para P, K, Mg, Cu, Mn e Zn.

Analisando simultaneamente as Tabelas 5 e 6, constatou-se que as cultivares BRS Talento e Primavera apresentaram os maiores teores de N nas raízes, diferindo da Caiapó, sendo que na parte aérea a BRS Talento mostrou-se mais eficiente no transporte deste nutriente. Para o P, a BRS Talento apresentou maior teor na raiz que junto com a Caiapó demonstraram maior eficiência no transporte de P para a parte aérea. Quanto ao K e Zn a BRS Talento demonstrou ser mais eficiente tanto na absorção pelas raízes como no transporte para a parte aérea. No entanto, a cultivar mais eficiente na absorção do Ca foi a Caiapó, sendo para o Mg a BRS Talento e Caiapó, e para o Fe a BRS Talento. Quanto à eficiência no transporte

para a parte aérea, a Primavera foi a mais eficiente para o Ca, e a BRS Talento para o Mg. Para o Fe não houve diferenças entre as cultivares. Para Cu e Mn não houve diferença entre as cultivares na absorção pelo sistema radicular, sendo que na parte aérea a BRS Talento demonstrou maior eficiência de transporte destes nutrientes diferindo da Caiapó e Primavera (Tabela 5 e 6).

Tabela 5. Teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco em raízes, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹				
BRS Talento	22,39a	7,39a	25,74a	6,02b	1,83a	21,81a	1026,50	29,92a	158,21a
Caiapó	19,53b	6,66b	23,58b	6,46a	1,96a	23,91a	805,99b	26,83a	137,87b
Primavera	21,51a	5,71c	21,89c	3,11c	1,54b	24,18a	670,68c	29,98a	138,57b
-----Valor de F-----									
Cultivar (C)	24,49**	46,26**	17,24**	402,93*	14,26**	2,61 ^{ns}	50,13**	2,48 ^{ns}	20,24**
Dose de alumínio (Al ³⁺)	3,81*	24,95**	36,08**	16,17**	50,81**	81,18**	4,75**	208,39*	27,03**
C x Al ³⁺	10,76**	3,46**	6,57**	2,91*	3,88*	9,22**	18,34**	33,94**	11,84**
-----Valor de F para análise de regressão do fator alumínio-----									
R.L.	0,38 ^{ns}	3,72 ^{ns}	12,45**	3,76**	135,83*	207,55	2,87 ^{ns}	453,50*	8,59**
R.Q.	10,69**	44,70**	12,37**	26,97**	12,37**	33,16	0,07 ^{ns}	161,61*	68,47**
Cultivar BRS Talento									
R.L.	5,84*	0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,67 ^{ns}	64,35**	112,49*	1,49 ^{ns}	157,66*	0,04 ^{ns}
R.Q.	41,95**	47,52**	73,58**	7,31**	16,**	17,14**	42,10**	78,15**	84,52**
Cultivar Caiapó									
R.L.	16,53**	6,54*	7,59**	8,17**	23,94**	68,92**	56,48**	139,90*	0,48 ^{ns}
R.Q.	1,66 ^{ns}	5,61*	38,03**	19,34**	0,39 ^{ns}	17,72**	3,86*	1,12 ^{ns}	17,51**
Cultivar Primavera									
R.L.	7,43**	3,02 ^{ns}	10,39**	14,24**	52,89**	36,53**	1,44 ^{ns}	166,45*	35,54**
R.Q.	0,23 ^{ns}	4,51*	1,49 ^{ns}	11,79**	1,92 ^{ns}	2,63 ^{ns}	2,22 ^{ns}	146,87*	0,91 ^{ns}
C.V. (%)	5,85	7,51	7,83	7,00	12,59	13,73	12,16	15,79	7,09

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1% e 5%, e não significativo, respectivamente.

Tabela 6. Teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco na parte aérea, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----			
BRS Talento	40,17a	6,48a	25,53a	7,26b	3,21a	24,09a	290,17a	390,66a	131,19a
Caiapó	36,88b	6,66a	24,04b	7,03b	3,05b	14,92b	295,62a	247,21c	96,33b
Primavera	37,12b	5,38b	23,14c	7,86a	2,72c	16,78b	280,87a	273,42b	97,26b
-----Valor de F-----									
Cultivar (C)	24,07**	14,51**	22,63**	7,07**	39,32**	69,05**	0,45 ^{ns}	115,78*	23,45**
Dose de alumínio (Al ³⁺)	8,22**	94,42**	90,75**	16,47**	200,33*	49,23**	8,69**	49,83**	3,19*
C x Al ³⁺	1,28 ^{ns}	3,11*	15,69**	0,85 ^{ns}	6,12**	85,44**	1,56 ^{ns}	6,54**	12,24**
-----Valor de F para análise de regressão do fator alumínio-----									
R.L.	1,25 ^{ns}	194,21*	182,57*	4,08*	576,76*	72,66**	22,05**	146,89*	0,23 ^{ns}
R.Q.	6,47**	69,32*	88,40**	7,52**	19,84**	74,85**	1,13 ^{ns}	0,06 ^{ns}	9,27**
Cultivar BRS Talento									
R.L.	20,21**	60,03**	189,81*	6,49*	286,2**	299,59*	9,42**	72,65**	27,41**
R.Q.	0,03 ^{ns}	8,55**	4,35*	5,54*	30,08**	19,45**	7,55**	0,06 ^{ns}	0,29 ^{ns}
Cultivar Caiapó									
R.L.	3,02 ^{ns}	106,71*	15,47**	10,47**	173,95*	151,57*	14,42**	8,87**	0,81 ^{ns}
R.Q.	0,01 ^{ns}	39,41**	52,75**	9,79**	0,47 ^{ns}	84**	0,04 ^{ns}	1,00 ^{ns}	10,23**
Cultivar Primavera									
R.L.	11,97 ^{ns}	36,72**	32,37**	18,11**	131,96**	95,41**	2,83 ^{ns}	90,06**	26,77**
R.Q.	0,01 ^{ns}	,24**	48,11**	0,66 ^{ns}	2,39 ^{ns}	1,92 ^{ns}	0,51 ^{ns}	2,77 ^{ns}	6,82*
C.V. (%)	3,93	11,77	4,19	8,68	5,30	12,50	15,35	9,35	15,16

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1% e 5%, e não significativo, respectivamente.

No sistema radicular houve incremento nos teores de N com o aumento dos níveis de alumínio, exceto para a Caiapó, sendo verificado resposta positiva e quadrática para a Primavera e linear na BRS Talento (Figura 10).

Na presença do alumínio a cultivar BRS Talento aumentou o teor de N nas raízes até na dose de 23 mg Al³⁺ L⁻¹, sendo que, os menores teores foram verificados na Caiapó. Esses resultados podem estar relacionados às características genéticas. Cultivares do grupo moderno, como a BRS Talento, passaram por melhoramento genético visando maior

capacidade produtiva de grãos (EMBRAPA, 2001). Já na ausência do alumínio a Caiapó apresentou maior teor de N no sistema radicular, no entanto, com o aumento das doses de Al^{3+} o teor de N foi reduzindo de forma negativa e linear demonstrando ser a cultivar mais sensível à absorção deste elemento em condições de elevada acidez (Figura 10).

Na parte aérea verificou-se que não houve efeito significativo da interação entre as cultivares e doses de alumínio (Tabela 6). Nota-se, que a cultivar BRS Talento apresentou o maior teor de N tanto na presença como na ausência do alumínio, sendo que, os menores valores foram registrados na Primavera e Caiapó (Figura 11). Os maiores teores de N verificado na BRS Talento pode ser atribuído, ao melhoramento genético que passaram as cultivares do grupo moderno visando maior capacidade produtiva de grão (EMBRAPA, 2001). Segundo Fageria & Carvalho (1982), cultivares de arroz sensíveis à toxidez de alumínio apresentam teores de N 3 a 4 vezes mais elevado que cultivares tolerantes. Isso se deve ao fato de que, quando expostas à soluções nutritivas que contêm NH_4^+ , quaisquer que sejam as suas proporções em relação ao NO_3^- , as plantas passam a absorver preferencialmente aquele cátion, até o seu esgotamento completo ou quase completo, entretanto, à medida que as cultivares sensíveis aumentam a absorção de NH_4^+ , tendem a incrementar a liberação de H^+ , conseqüentemente reduzindo o pH do meio (MENDONÇA et al., 2005). Esse resultado indica que a adubação com NH_4^+ , ao invés de minimizar a toxicidade do Al^{3+} , como sugerem Antunes & Nunes (1997) para triticales, pode aumentar as intensidades dos efeitos tóxicos do Al^{3+} no arroz (Figuras 6 e 7).

Com relação ao P na raiz, verifica-se incremento nos teores do nutriente com o aumento dos níveis de alumínio, que proporcionou resposta positiva e quadrática até na dose de 15, 16 e 20 mg L^{-1} , respectivamente para a Primavera, Caiapó e BRS Talento (Figura 12). A presença de baixos níveis alumínio aumentou o teor de P na raiz, o que ocorreu talvez foi a precipitação desse nutriente com o Al presente no espaço livre aparente e nas superfícies celulares (VENEGAS et al., 1995).

Na parte aérea os teores de P, apresentaram resposta negativa e quadrática aos níveis de alumínio. Na ausência do alumínio, a cultivar Caiapó apresentou os maiores teores de P e o menor valor foi observado na Primavera, tanto na raiz como na parte aérea (Figura 13). Esses resultados corroboram com os de Marcklon & Sim (1992), que evidenciaram que a toxidez de alumínio é associada ao aumento no teor de fósforo no sistema

radicular e redução contínua no teor da parte aérea. Ocorrendo inicialmente uma absorção/precipitação do fósforo na forma de fosfato de alumínio no espaço livre aparente, seguida de redução da absorção do fósforo, reduzindo a translocação para a parte aérea (CALBO & CAMBRAIA, 1980). É possível que essa interação ocorra tanto na parede celular quanto externamente à plasmaléma nas células da coifa ou nos vacúolos de células das raízes (MARKLON & SIM, 1992). Nas células o alumínio passa a interferir no metabolismo de açúcares fosforilados, nucleotídeos e ácidos nucléicos, inclusive no DNA (MATSUMOTO et al., 1976). Sob condições de hipoxia a toxidez de alumínio manifesta-se primariamente por uma queda nos níveis de nucleotídeos, inclusive a ATP. Adicionalmente, o Al forma complexo com ATP e inibe as ATPases (CALBO & CAMBRAIA, 1980), e outras fosfatases da membrana plasmática dificultando ou impedindo a utilização destas formas de energia pelas células. Além disso, o alumínio pode reduzir a solubilidade do fósforo na solução externa às raízes, tornando-o menos disponível para as plantas (CAMARGO, 1985).

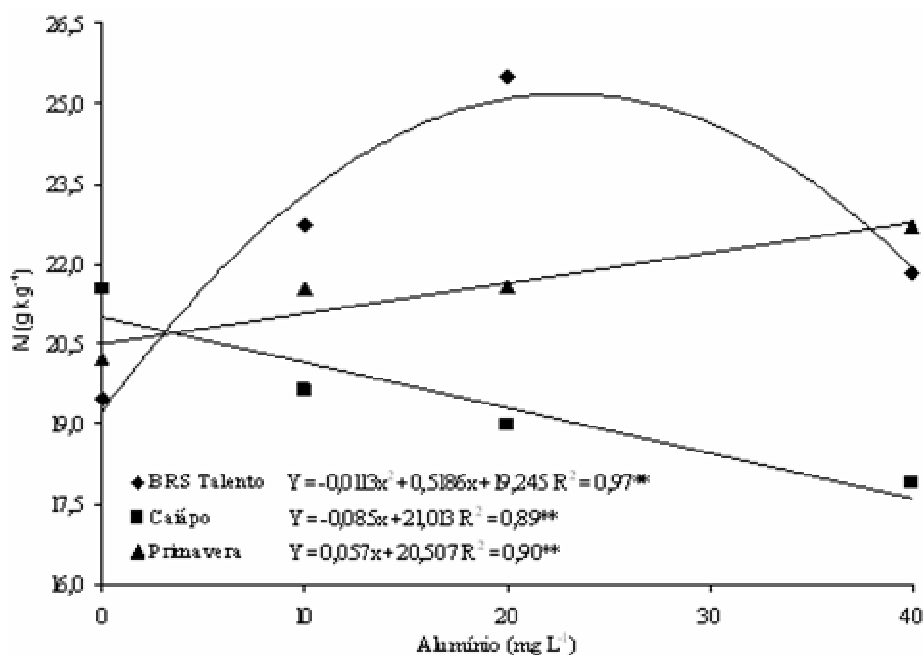


Figura 10. Teor de nitrogênio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

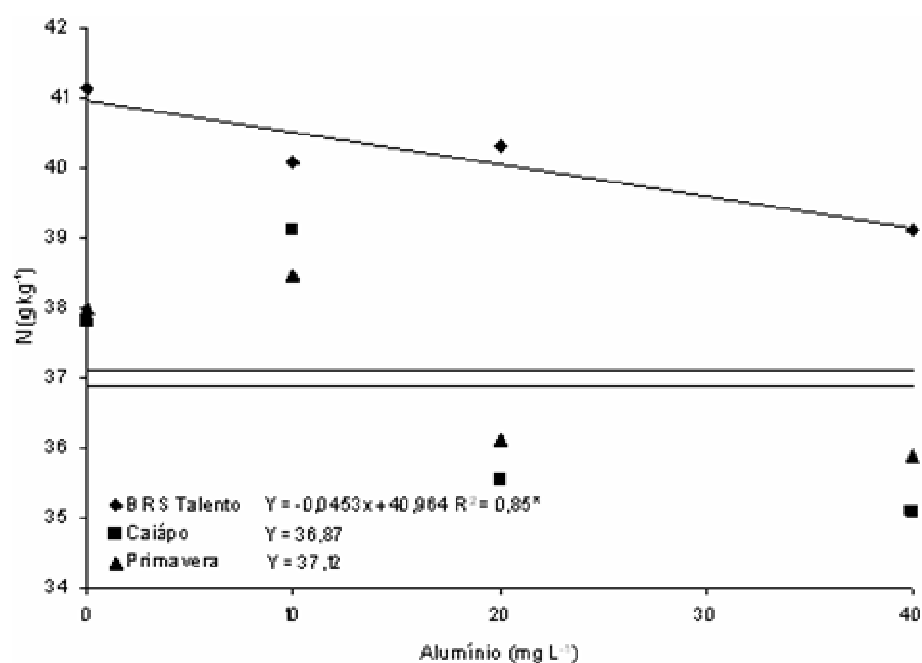


Figura 11. Teor de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

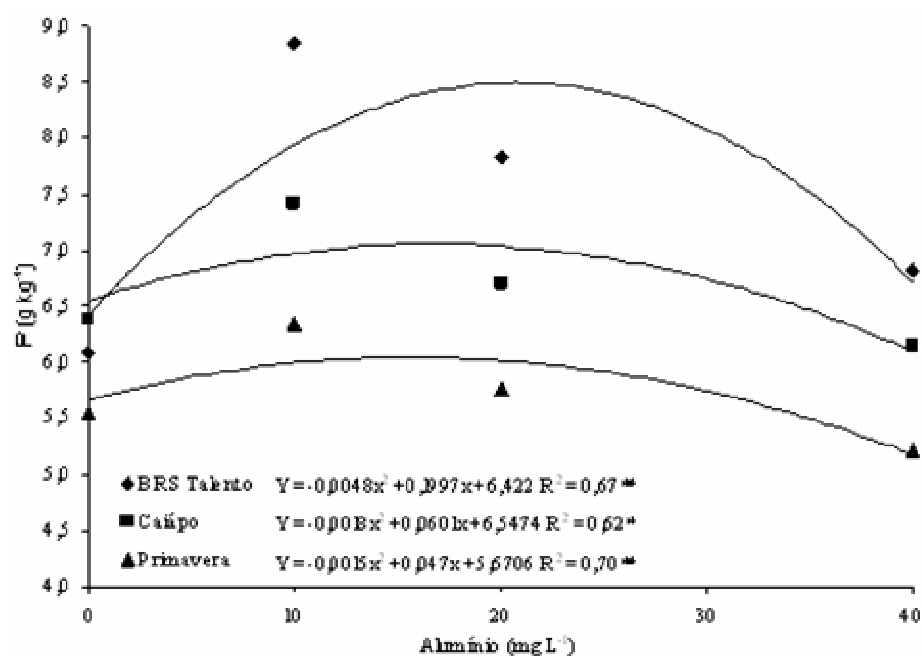


Figura 12. Teor de fósforo na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

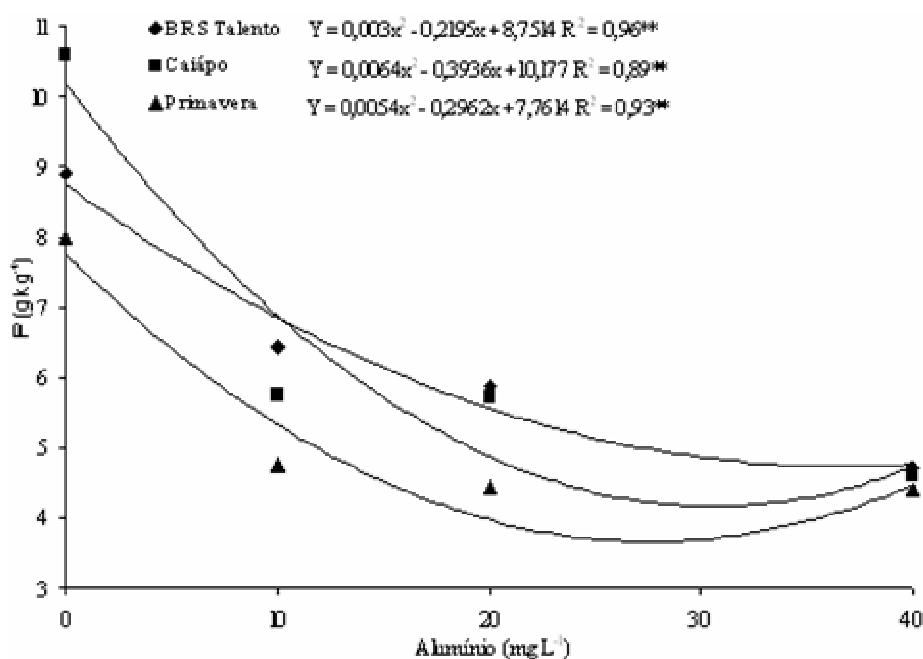


Figura 13. Teor de fósforo na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

No sistema radicular (Figura 14) e na parte aérea (Figura 15) os teores de K aumentaram em ambas as partes da planta com o aumento dos níveis de alumínio exceto para a Primavera que reduziu o seu teor na raiz. Na ausência do alumínio a cultivar BRS Talento apresentou maior teor de K na parte aérea. No entanto, com o aumento dos níveis de alumínio, a cultivar Primavera foi a que apresentou menor teor de K nas raízes e na parte aérea, sendo que os maiores valores foram registrados na BRS Talento.

A redução dos teores de K nas raízes e na parte aérea com o aumento dos níveis de alumínio, está em razão da competição dos cátions (Al^{3+} e K^{+}) por sítios de absorção nos transportadores ou em canais de influxo de cátions monovalentes e divalentes (KOCHIAN, 1995), reduzindo a sua translocação para a parte aérea (SIVAGURU & PALIWAL, 1993) ou reduzindo o suprimento de energia para os sistemas de transporte dependentes de energia (KOCHIAN, 1995).

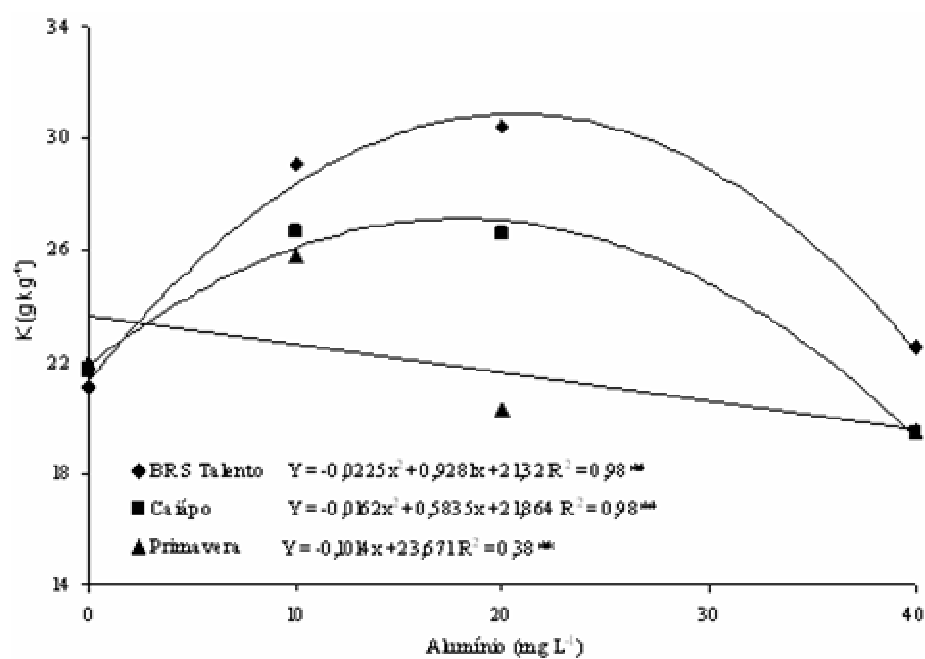


Figura 14. Teor de potássio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

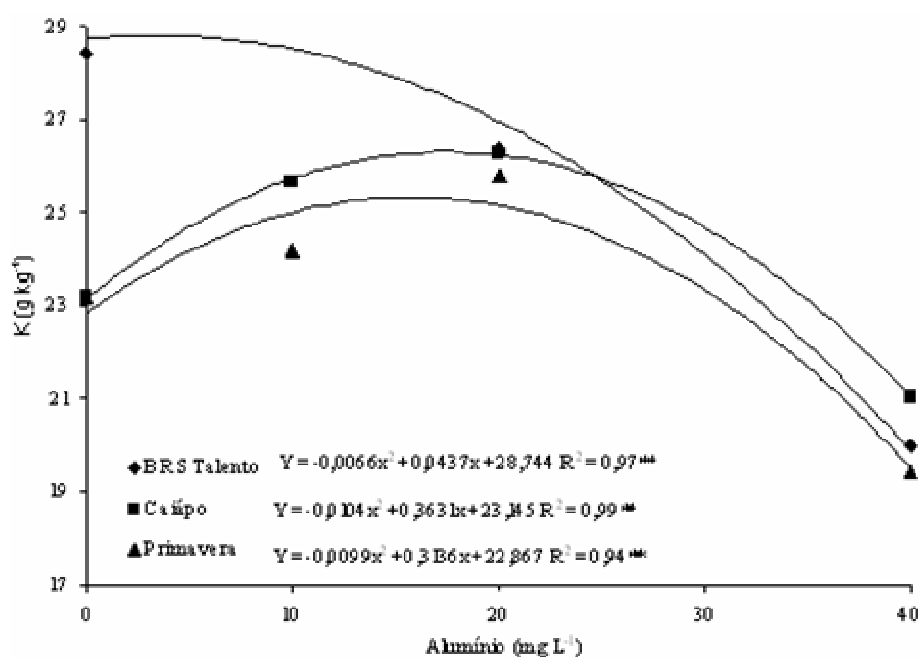


Figura 15. Teor de potássio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Com relação ao Ca no sistema radicular os níveis de alumínio proporcionaram nas cultivares resposta positiva e quadrática (Figura 16). Deve-se destacar que tanto na ausência como na presença de alumínio, a cultivar Caiapó apresentou os maiores teores de Ca na raiz, tendo assim, os menores valores registrados na Primavera. De acordo com Huang (1995), o Al^{3+} pode inibir a absorção de Ca^{2+} pelo bloqueamento dos canais de Ca na membrana plasmática.

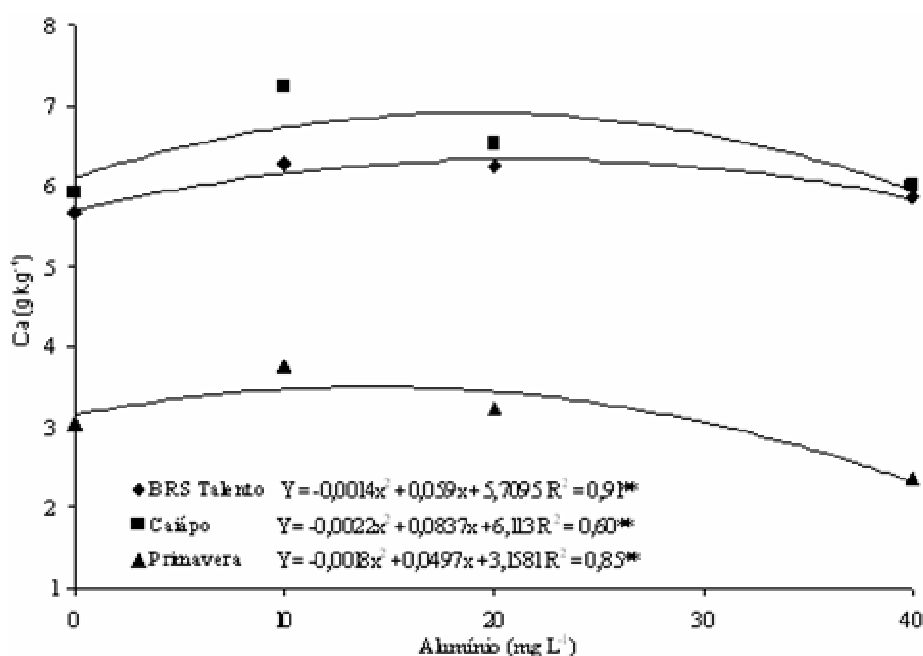


Figura 16. Teor de cálcio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Na parte aérea os teores de Ca não foram afetados pela interação, e assim pelos níveis de alumínio (Figura 17). Verifica-se, que as cultivares reduziram o teor de Ca na parte aérea em torno de 21% com o aumento dos níveis de alumínio. A cultivar Primavera apresentou os maiores teores de Ca, tanto na ausência como na presença de alumínio. A resposta para a redução do teor de Ca na parte aérea pode ser explicada em razão do alumínio interferir na atividade da enzima ATPase, estimulada pela calmodulina, sendo esta uma proteína transportadora, que exerce papel importante na manutenção do potencial da

membrana (SIEGEL & HAUG, 1983). A afinidade do alumínio com a calmodulina é cerca de 2,5 a 10 vezes maior que a do cálcio: Sua ligação à molécula da calmodulina provoca mudanças conformacionais, de tal modo que há uma diminuição ou perda total de sua capacidade reguladora.

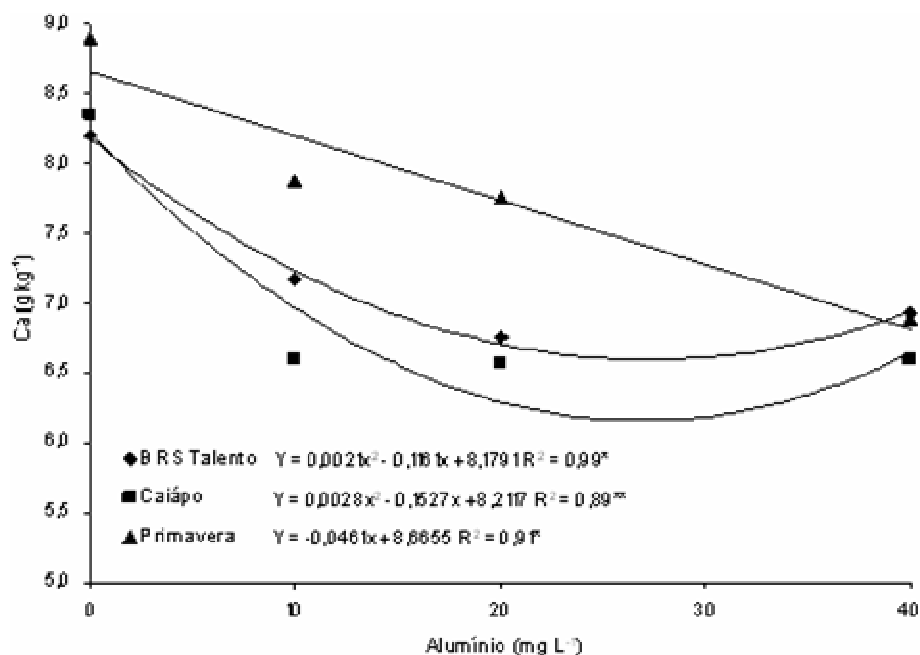


Figura 17. Teor de cálcio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Os níveis de alumínio reduziram os teores de Mg nas cultivares, tanto nas raízes (Figura 18) quanto na parte aérea (Figura 19). Essa redução pode ser um possível efeito do alumínio interferindo na absorção do magnésio bloqueando os canais iônicos da membrana das células radiculares (HUNG et al., 1992), e os sítios de ligações desse nutriente às células protéicas transportadoras (RENGEL & ROBSON, 1989).

Entretanto, o raio iônico do Al^{3+} é bastante similar com o do íon Mg , em tamanho. Assim, o alumínio pode cruzar a membrana permeando lentamente um canal de cátions bivalente que normalmente funciona na absorção de Mg^{+2} , diminuindo dessa maneira a absorção de magnésio pelas plantas (HUNG et al., 1992).

No tocante os teores de Cu no sistema radicular (Figura 20) e na parte aérea (Figura 21), houve aumento com o incremento dos níveis de alumínio, com exceção da Caiapó que respondeu de forma negativa e quadrática na parte aérea. A resposta para o aumento no teor de cobre tanto nas raízes como na parte aérea, pode ser devido ao antagonismo do alumínio com relação ao cobre (LIEBING et al., 1942).

O teor de Fe no sistema radicular (Figura 22), da cultivar BRS Talento reduziu e na Caiapó aumentou, sendo que, na Primavera não houve efeito. Na ausência do alumínio, a cultivar BRS Talento apresentou o maior teor de Fe na raiz, sendo o menor valor foi verificado na Caiapó. Na parte aérea (Figura 23), verificou-se que os teores de Fe não foram afetados pela interação, e sim pelos níveis de alumínio. Na ausência de alumínio a cultivar BRS Talento apresentou o maior teor de Fe na parte aérea, sendo o menor valor verificado na Caiapó. Para Nogueira et al. (1989), a toxicidade de alumínio é frequentemente acompanhada por altos teores de Fe na parte aérea e baixos teores de Ca e Mg nos tecidos da plantas.

No sistema radicular (Figura 24) e na parte aérea (Figura 25) os teores de Mn foram reduzido com o aumento dos níveis de alumínio. Na ausência do alumínio a cultivar Caiapó apresentou os menores teores de Mn, tanto no sistema radicular como na parte aérea. Na parte aérea a cultivar BRS Talento apresentou os maiores teores de Cu, tanto na presença como na ausência de alumínio.

O aumento dos níveis de alumínio incrementou os teores de Zn tanto na raiz (Figura 26) como na parte aérea (Figura 27), exceto na BRS Talento que reduziu na parte aérea. Na ausência do alumínio a cultivar BRS Talento apresentou os maiores teores de Zn tanto nas raízes como na parte aérea, sendo que, os menores valores foram verificados na Primavera, que apresentou teor 2,5 vezes menor que a BRS Talento na parte aérea. Com o aumento dos níveis de alumínio a cultivar BRS Talento apresentou o maior incremento no teor de Zn nas raízes até a dose de $20,60 \text{ mg Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$.

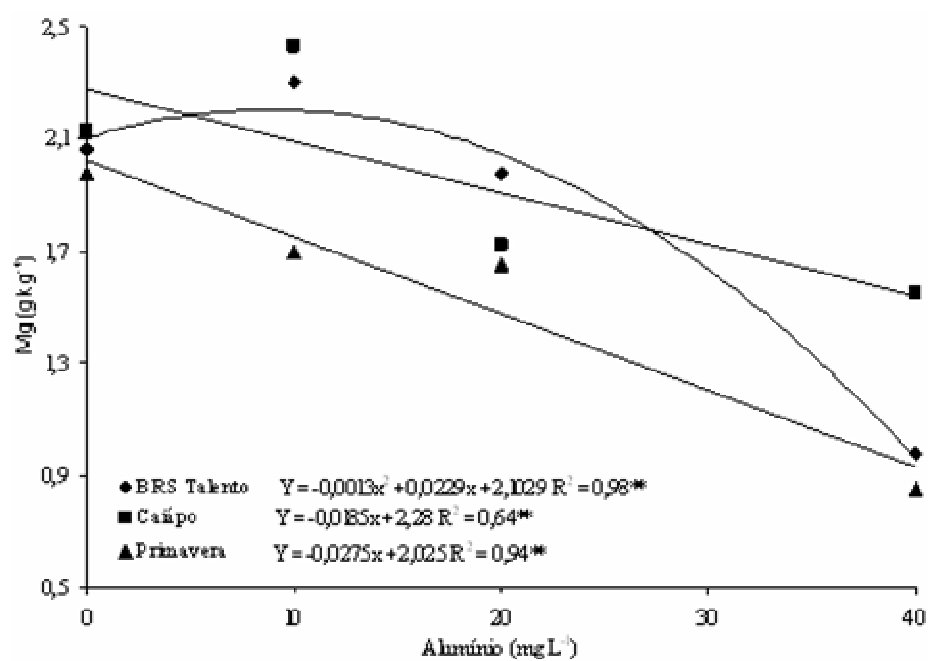


Figura 18. Teor de magnésio na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

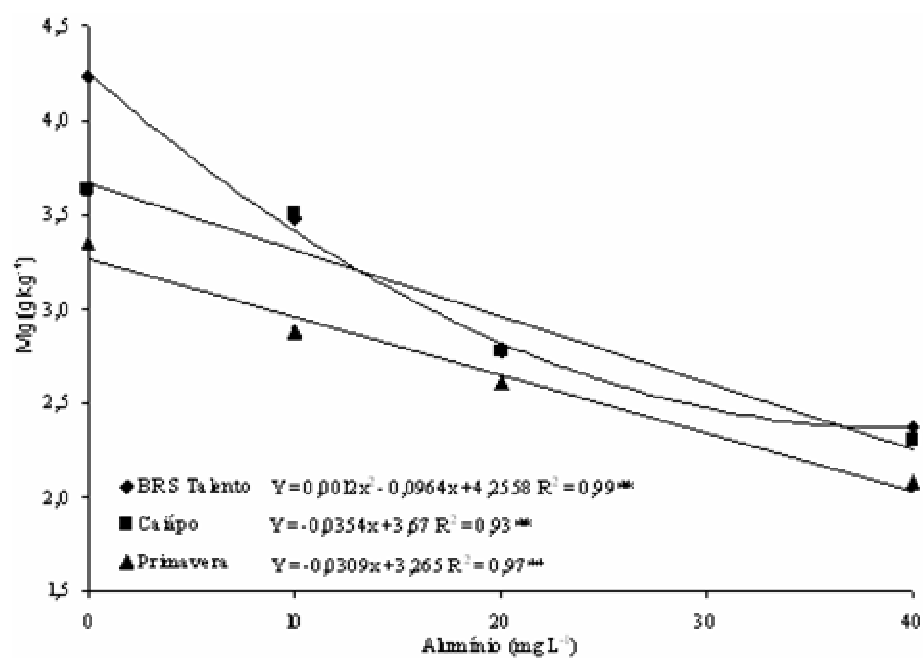


Figura 19. Teor de magnésio na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

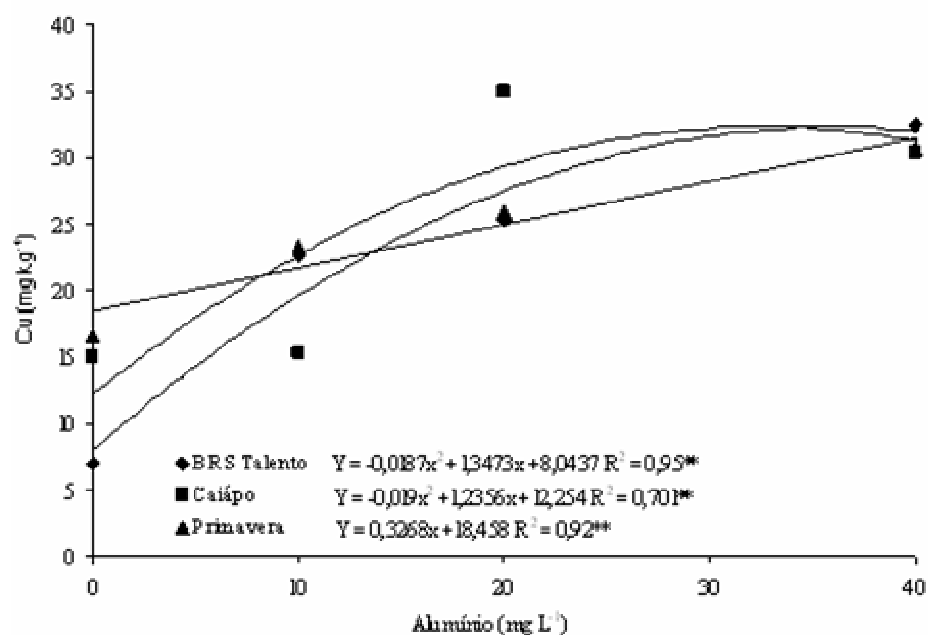


Figura 20. Teor de cobre na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

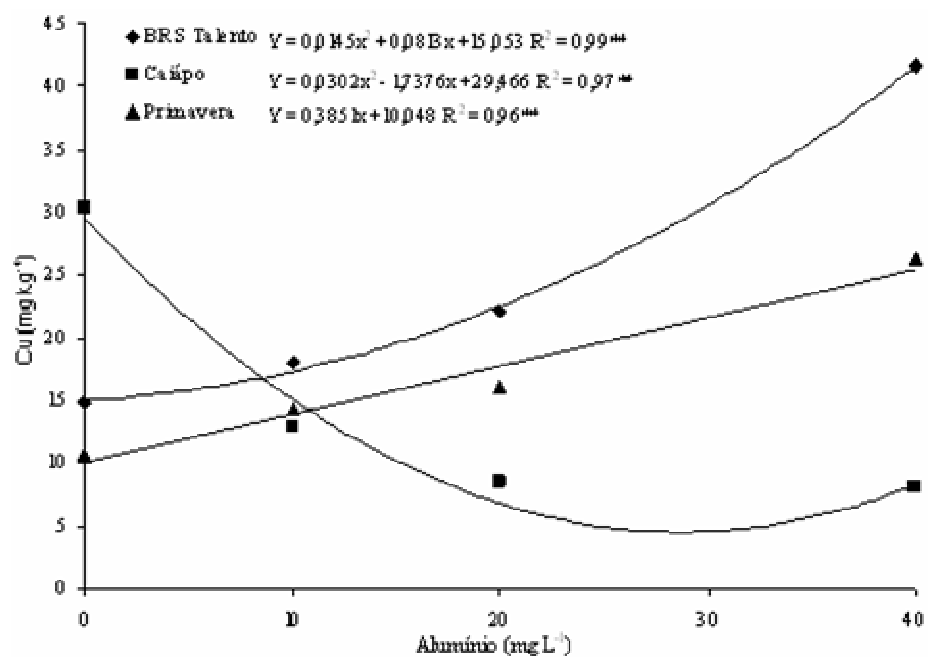


Figura 21. Teor de cobre na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

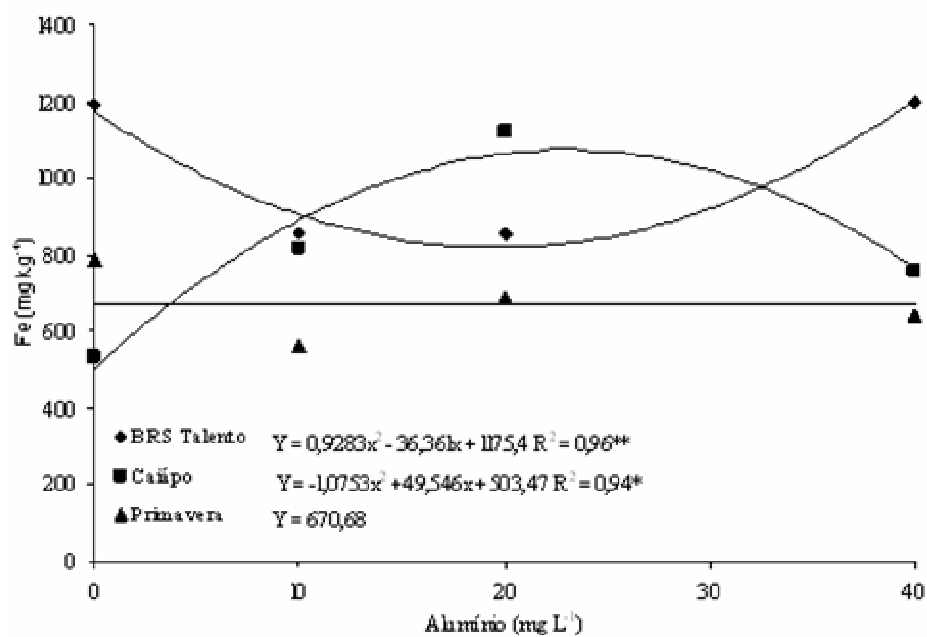


Figura 22. Teor de ferro na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

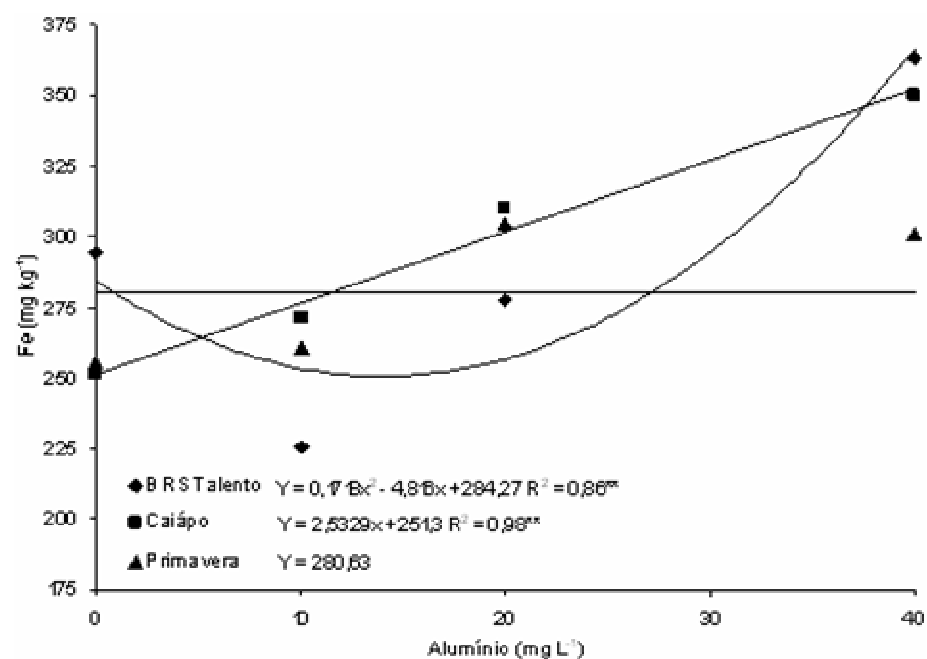


Figura 23. Teor de ferro na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

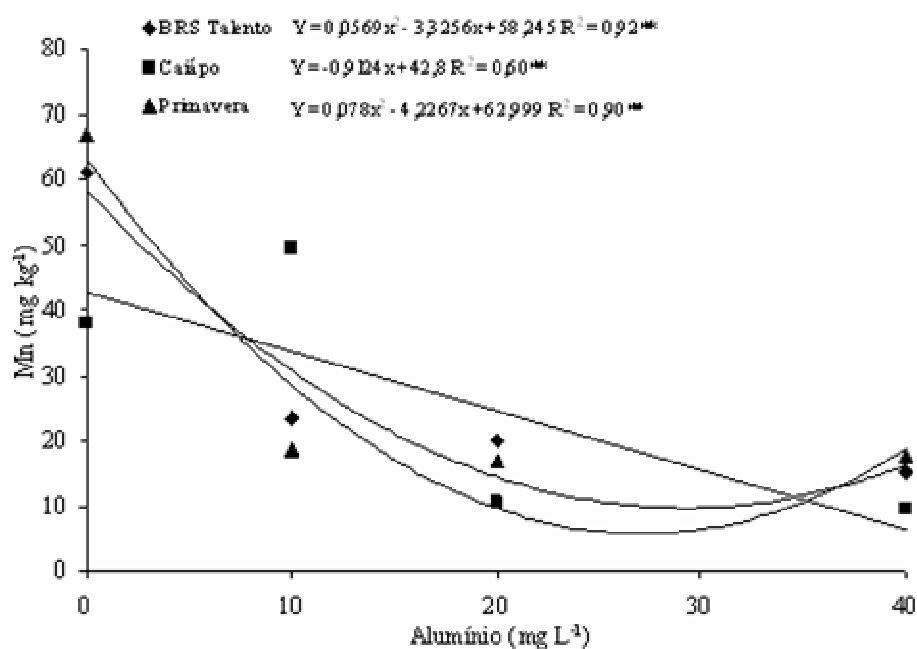


Figura 24. Teor de manganês na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

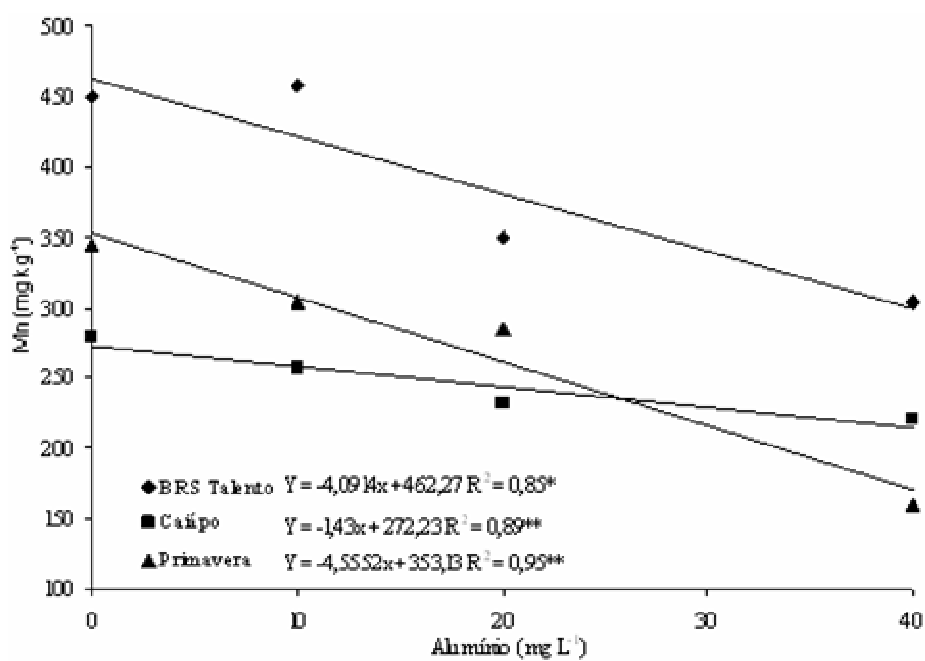


Figura 25. Teor de manganês na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

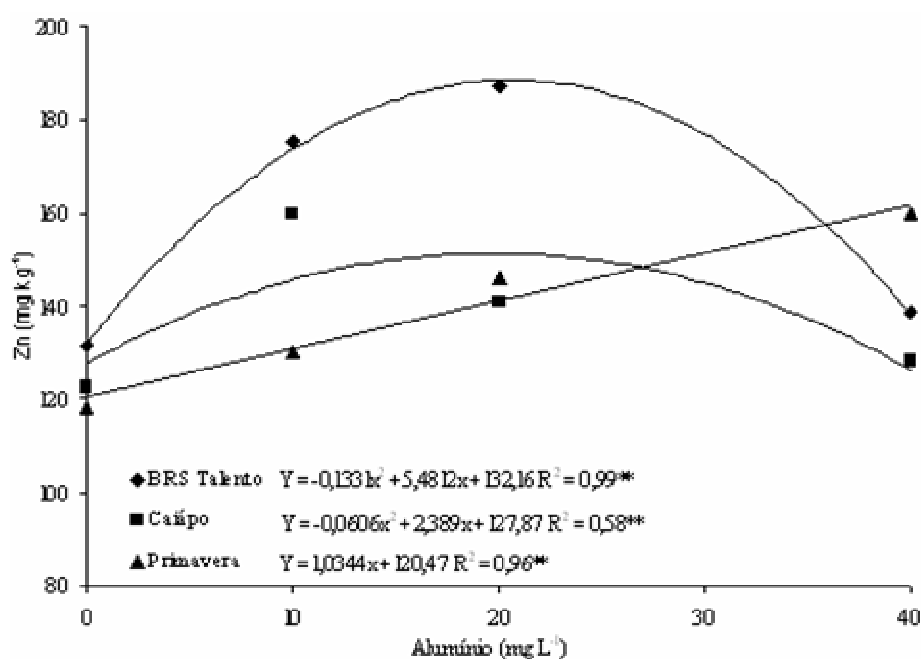


Figura 26. Teor de zinco na matéria seca do sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

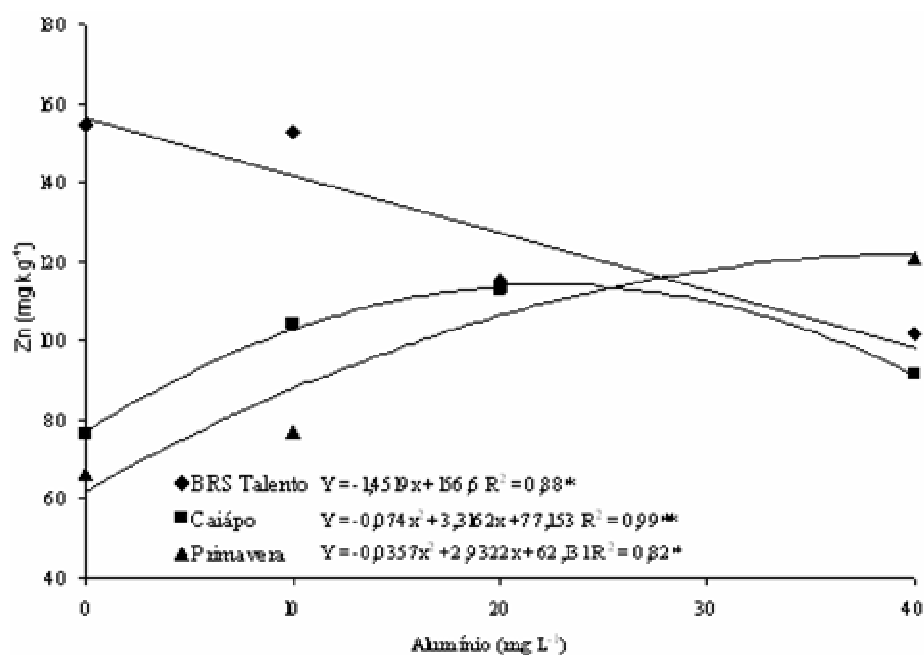


Figura 27. Teor de zinco na matéria seca da parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Com relação aos teores de nutrientes podem-se inferir que a cultivar BRS Talento do grupo moderno, apresentou os maiores teores na raiz de N, P, K, Mg, Cu e Zn, e na parte aérea para K, Mg e Zn com o aumento dos níveis de alumínio. Os resultados apresentados por esta cultivar podem estar relacionados a características genéticas, visando maior capacidade de produtiva de grãos (EMBRAPA, 2001).

Se o alumínio é um elemento benéfico ou se ele proporciona um balanço iônico favorável à absorção de alguns nutrientes, como referem Andrew et al. (1973), ainda não se pode afirmar, mas são aspectos a serem considerados e melhor estudados.

O Mg e o Mn foram os nutrientes mais afetados pelo alumínio, apresentando as maiores reduções de absorção (Figuras 18 e 24) e no transporte de N, P, K, Ca, Mg e Mn (Figuras 11, 13, 15, 17, 19 e 25). Esses resultados corroboram com as afirmações de Foy (1974), segundo o qual o excesso de alumínio, além de inibir a formação normal da raiz, interfere na absorção, transporte e uso de nutrientes pelas plantas. Mendonça et al. (2003) e Freitas et al. (2006), constataram que doses crescentes de alumínio reduziram a absorção e transporte de P, Ca, Mg, S, Fe e Mn para a parte aérea de plantas de arroz, corroborando em parte os resultados obtidos no presente trabalho.

6.4. Quantidade acumulada de nutrientes nas raízes e na parte aérea

As quantidades acumuladas de nutrientes na matéria seca radicular e da parte aérea estão contidas nas Tabelas 7 e 8 respectivamente.

No sistema radicular houve efeito das cultivares para as quantidades acumuladas de N, P, Ca, Cu, Fe e Zn (Tabela 7). Nota-se ainda efeito significativo para os níveis de alumínio e para a interação entre fatores para N, Mg, Fe, Mn e Zn. A cultivar BRS Talento e Primavera apresentaram as maiores quantidades acumuladas na raiz de N e Zn.

Para o acúmulo de Fe, o maior valor foi verificado na BRS Talento, e também para o Ca junto com a Caiapó, e sobressaindo-se também quanto ao P diferindo da Caiapó (Tabela 7)

Tabela 7. Quantidade acumulada de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco nas raízes, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg planta ⁻¹ -----					----- µg planta ⁻¹ -----			
BRS Talento	14,15a	4,71a	16,51a	3,82a	1,22a	12,82b	636,53a	19,97a	101,38a
Caiapó	11,51b	3,98b	14,35a	3,86a	1,19a	13,76b	489,96b	17,31a	82,85b
Primavera	15,52a	4,16ab	15,92a	2,31b	1,14a	17,71a	479,51b	19,61a	100,62a
	----- Valor de F -----								
Cultivar (C)	11,03**	4,02*	2,05 ^{ns}	24,45**	0,42 ^{ns}	7,55**	8,35**	2,14 ^{ns}	5,21*
Dose de alumínio (Al ³⁺)	23,07**	42,40**	37,60**	27,67**	41,48**	27,09**	9,28**	110,21*	28,64**
C x Al ³⁺	2,33**	1,74 ^{ns}	0,72 ^{ns}	2,05 ^{ns}	2,85*	1,87 ^{ns}	8,06**	30,77**	4,14**
	----- Valor de F para análise de regressão do fator alumínio -----								
R.L.	13,19**	25,50**	13,13**	22,88**	70,92**	14,64**	9,32**	296,04*	7,47**
R.Q.	53,08**	80,02**	16,85**	46,71**	42,35**	66,58**	18,03**	28,24**	71,50**
	Cultivar BRS Talento								
R.L.	12,54**	20,34**	13,46**	15,81**	44,45**	4,85*	16,16**	149,67*	15,36**
R.Q.	15,81**	24,37**	23,92**	7,01*	8,95**	17,60**	3,44 ^{ns}	42,24**	25,27**
	Cultivar Caiapó								
R.L.	11,35**	10,92**	34,57**	8,43**	17,82**	2,54 ^{ns}	0,43 ^{ns}	84,62**	6,74*
R.Q.	12,26**	28,49**	6,43*	28,82**	14,26**	28,86**	48,47**	6,15**	24,94**
	Cultivar Primavera								
R.L.	0,38 ^{ns}	0,86 ^{ns}	2,08 ^{ns}	1,96 ^{ns}	13,67**	8,01**	0,37 ^{ns}	70,02**	3,17 ^{ns}
R.Q.	26,43 ^{ns}	27,23**	20,35**	14,60**	20,28**	20,83**	5,05*	26,89**	21,40**
C.V. (%)	17,89	17,60	20,00	21,43	22,76	25,55	27,70	20,80	19,37

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1% e 5%, e não significativo, respectivamente.

Na parte aérea, com exceção do P e Mg verificou-se efeito significativo para as cultivares sobre a quantidade acumulada de nutrientes, dos níveis de alumínio para todas as variáveis e da interação entre fatores para N, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn (Tabela 8). De maneira geral, destacou-se que a Primavera apresentou as maiores quantidades acumuladas na parte aérea de N, K, Ca e Fe e também para Cu e Mn junto com a BRS Talento, sobressaindo-se também para Zn (Tabela 8). Estes resultados podem estar

diretamente relacionados com a maior produção de matéria seca da parte aérea obtida pela cultivar Primavera, como pode ser verificado na Figura 6.

Tabela 8. Quantidade acumulada de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco na parte aérea, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg planta ⁻¹					ug planta ⁻¹			
BRS Talento	93,71b	15,46a	61,16b	16,88b	7,69a	51,06a	648,89b	939,33a	314,69a
Caiapó	95,63b	16,53a	63,73b	17,82b	8,11a	36,43b	753,17b	641,85b	259,22b
Primavera	121,61a	16,83a	78,01a	25,75a	9,05a	51,68a	914,34a	929,33a	323,17a
	Valor de F								
Cultivar (C)	11,08**	1,36 ^{ns}	7,74**	27,86**	2,20 ^{ns}	17,74**	8,71**	12,58**	3,58*
Dose de alumínio (Al ³⁺)	46,75**	75,21**	54,46**	40,25**	39,99**	8,59**	21,18**	40,74**	30,89**
C x Al ³⁺	3,03*	1,38 ^{ns}	4,34**	3,76**	3,11*	23,65**	3,94**	2,62*	8,77**
	Valor de F para análise de regressão do fator alumínio								
R.L.	37,35**	204,79*	45,69**	52,41**	70,01**	0,58 ^{ns}	3,50 ^{ns}	6,31**	10,11**
R.Q.	97,61	19,49**	123,67*	67,68**	43,07**	24,98**	59,81*	54,85**	82,55**
	Cultivar BRS Talento								
R.L.	14,36**	76,46**	27,54**	17,50**	32,06**	15,03**	1,91 ^{ns}	34,06**	26,92**
R.Q.	9,09**	1,02 ^{ns}	8,68**	2,81 ^{ns}	0,93 ^{ns}	7,47**	0,68 ^{ns}	6,56**	4,07*
	Cultivar Caiapó								
R.L.	13,08**	83,38**	10,19**	15,05**	21,29**	77,94**	0,97 ^{ns}	7,83**	2,64 ^{ns}
R.Q.	38,52**	10,87**	52,97**	20,97**	25,03**	1,51 ^{ns}	31,61**	13,81**	37,11*
	Cultivar Primavera								
R.L.	10,10**	47,75**	9,98**	20,04**	17,82**	13,17**	0,64 ^{ns}	25,38**	1,71*
R.Q.	62,26	11,13**	81,67**	63,94**	29,17**	51,19**	48,41**	42,89**	58,18**
C.V. (%)	18,06	15,11	19,29	18,30	22,56	17,67	23,47	22,76	24,53

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1% e 5%, e não significativo, respectivamente.

Através do desdobramento das interações, níveis de alumínio dentro de cultivares, observam-se resposta positiva e quadrática ao acúmulo de nutrientes nas raízes para N (Figura 28), Mg (Figura 36) e Zn (Figura 44) e na parte aérea para N (Figura 29), K

(Figura 33), Mn (Figura 43) e Zn (Figura 45). Verificou-se ainda que na ausência de alumínio a cultivar BRS Talento apresentou os maiores acúmulo de N, Mg e Zn nas raízes e na parte aérea para N, K, Mn e Zn, entretanto, com o aumento dos níveis de alumínio os maiores incrementos no acúmulo destes nutrientes foi verificado na Primavera. O comportamento das cultivares com relação a quantidade acumulada de nutrientes discutidos acima estão diretamente relacionados com crescimento radicular, e com o acúmulo de matéria seca na raízes e na parte aérea (Figuras 1, 5 e 6).

Vasconcellos (1987), relata que a redução no acúmulo de alguns nutrientes pode ser devido à própria redução no desenvolvimento das plantas provocada pelo alumínio, mesmo que a disponibilidade de alguns nutrientes se eleva com a redução do pH. Os resultados obtidos corroboram com o de Santos (1988).

Para as quantidades acumuladas de Fe (Figura 40) na raiz e para o Ca (Figura 35), Mg (Figura 37), Cu (Figura 39) e Fe (Figura 41) na parte aérea as cultivares Primavera e Caiapó apresentaram resposta positiva quadrática, enquanto que, a BRS Talento linear negativa ao aumento dos níveis de alumínio. Na ausência do alumínio a cultivar BRS Talento, obteve os maiores teores de Fe na raiz e Mg e Fe na parte aérea, tendo como resposta para estes valores o maior comprimento e, matéria seca radicular e matéria seca da parte aérea (Figuras 1, 5 e 6) observado nesta cultivar.

Verificou-se ainda, que a BRS Talento apresentou o maior acúmulo de Mg e Zn na raiz sob baixas doses de alumínio, sendo que, na ausência do alumínio para N, Mg, Fe e Zn. Os efeitos nesses nutrientes estão diretamente relacionados com o comportamento do crescimento radicular (Figura 1), matéria seca da raiz (Figura 5) e dos teores nas raízes (Figuras 10, 18, 22 e 26), tanto na ausência como na presença do alumínio. Já a cultivar Primavera apresentou o maior acúmulo de N, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn na parte aérea com o aumento dos níveis de alumínio, já na ausência do alumínio os maiores acúmulos destes nutrientes foram verificado na BRS Talento, sendo que, estes resultados podem estar relacionados com a maior produção de matéria seca da radicular e da parte aéreas, observadas nesses cultivares (Figura 5 e 6).

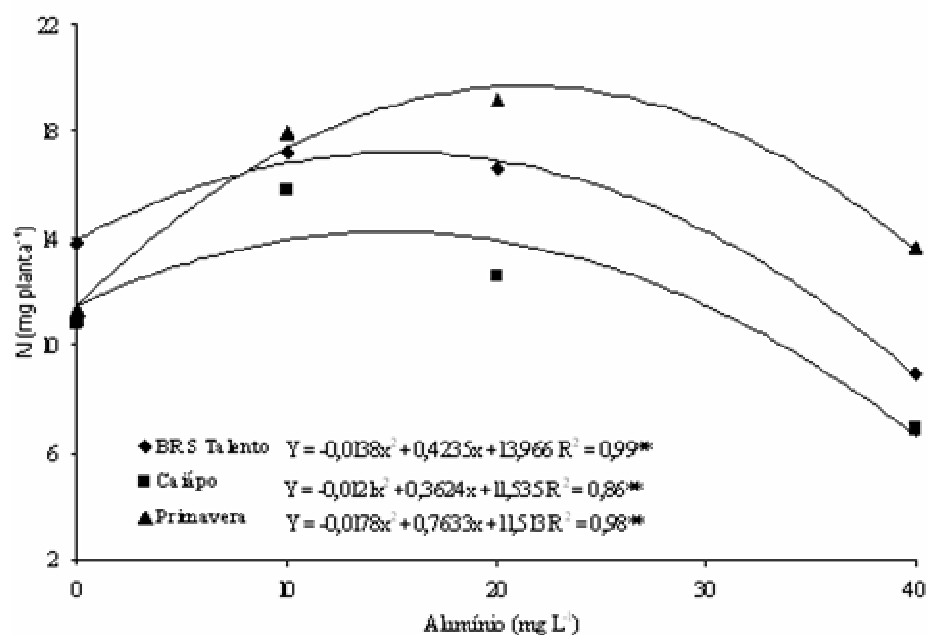


Figura 28. Nitrogênio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

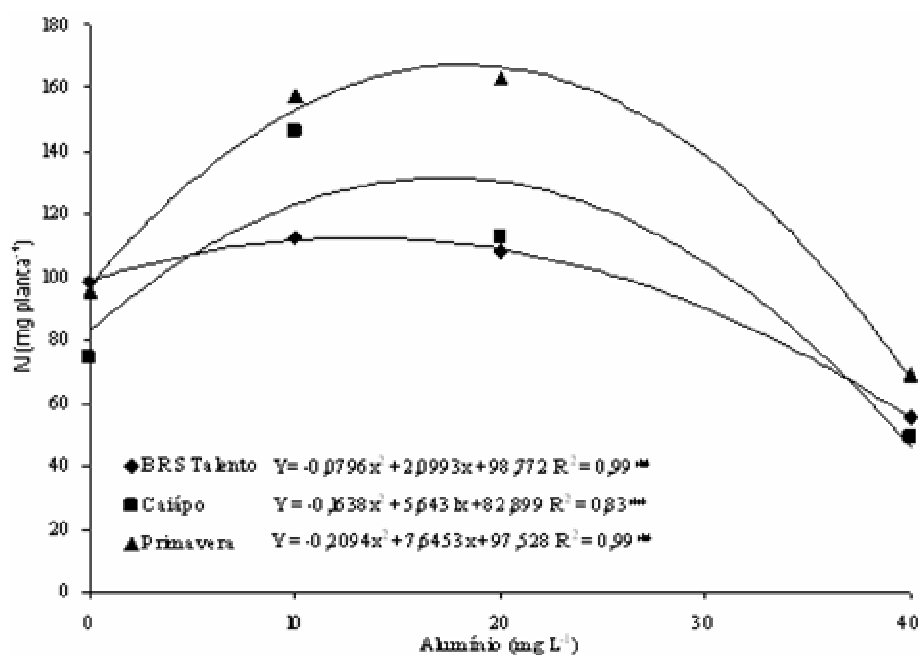


Figura 29. Nitrogênio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Com relação às quantidades acumuladas de P (Figura 30), K (Figura 32), Ca (Figura 34) e Cu (Figura 38) no sistema radicular e para P (Figura 31) na parte aérea, não foram constatados efeitos da interação entre os fatores, e sim para os níveis de alumínio como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8. Nota-se que os níveis de alumínio proporcionou incremento de forma positiva e quadrática nas cultivares para quantidades acumuladas de P, K, Ca e Cu no sistema radicular, e redução no P da parte aérea. Na ausência de alumínio a cultivar BRS Talento apresentou as maiores quantidades acumuladas de P, K e Ca no sistema radicular e na parte aérea para o P, sendo que, os menores valores para foram registrados na Primavera. Sob baixos níveis de alumínio as maiores quantidades acumuladas de P e K foram verificados na BRS Talento, para o Ca na Caiapó no sistema radicular.

De acordo com Calbo & Cambraia (1980) reduções no acúmulo de P na parte aérea com o aumento dos níveis de alumínio na solução deveu-se a adsorção-precipitação do fósforo nas raízes, reduzindo a translocação deste nutriente para a parte aérea. Londoño & Valencia (1983) complementaram esta teoria afirmando que a maior parte do alumínio incorporado pelas raízes liga-se a sítios de absorção na parede celular e sobre essa superfície o fosfato se precipita. Esses resultados corroboram com os de Santos (1988), Silva (1997), Tecchio (2003).

Com relação à quantidade acumulada de Cu (Figura 38) no sistema radicular, a cultivar Primavera apresentou as maiores quantidades acumuladas tanto na presença como na ausência do alumínio, sendo que, os menores valores foram registrados na BRS Talento. Os níveis de alumínio reduziram a quantidade acumulada de Cu nas cultivares BRS Talento e Primavera na parte aérea, sendo o inverso observado na Caiapó (Figura 42). Na ausência do alumínio, a cultivar BRS Talento apresentou o maior acúmulo na parte aérea.

Os incrementos na quantidade acumulada de Cu nas raízes, e na parte aérea podem estar diretamente relacionados ao acúmulo de matéria seca da raiz e na parte aérea (Figuras 5 e 6). Resultados semelhantes foram observados por Foy (1974), Vasconcellos (1987) e Santos (1998) que evidenciaram que os cátions de alumínio apresentam competição com o cobre pelo mesmo sítio de ligação nas raízes ou próximos de sua superfície, mas não pelo carregador envolvido na acumulação ativa.

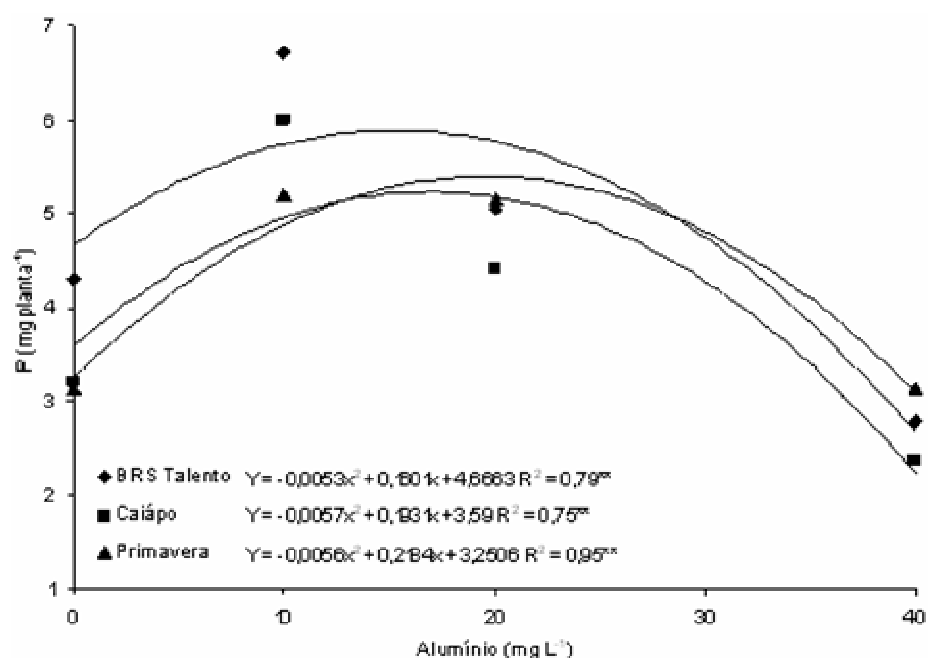


Figura 30. Fósforo acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

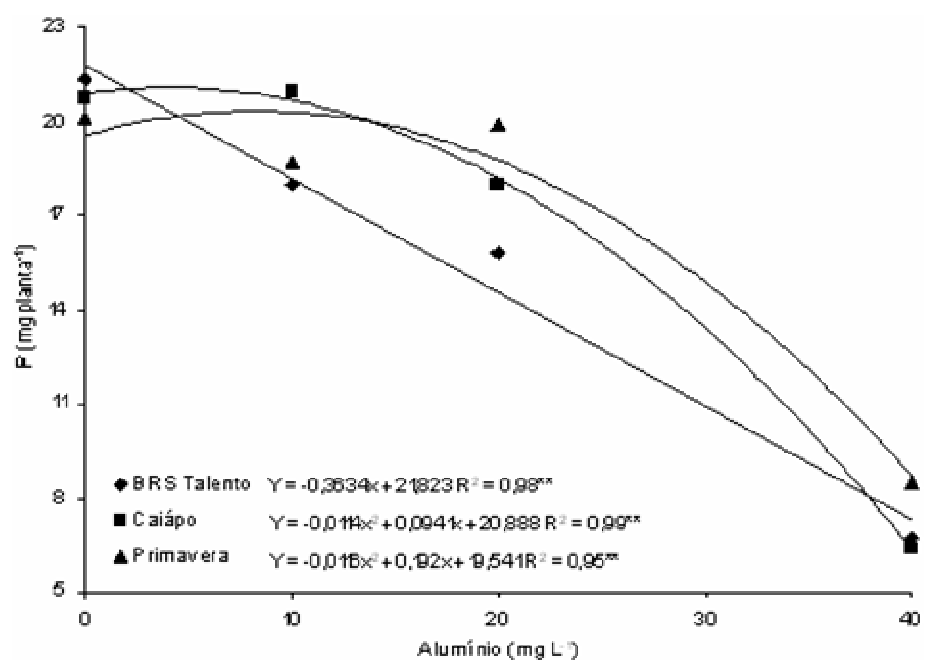


Figura 31. Fósforo acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

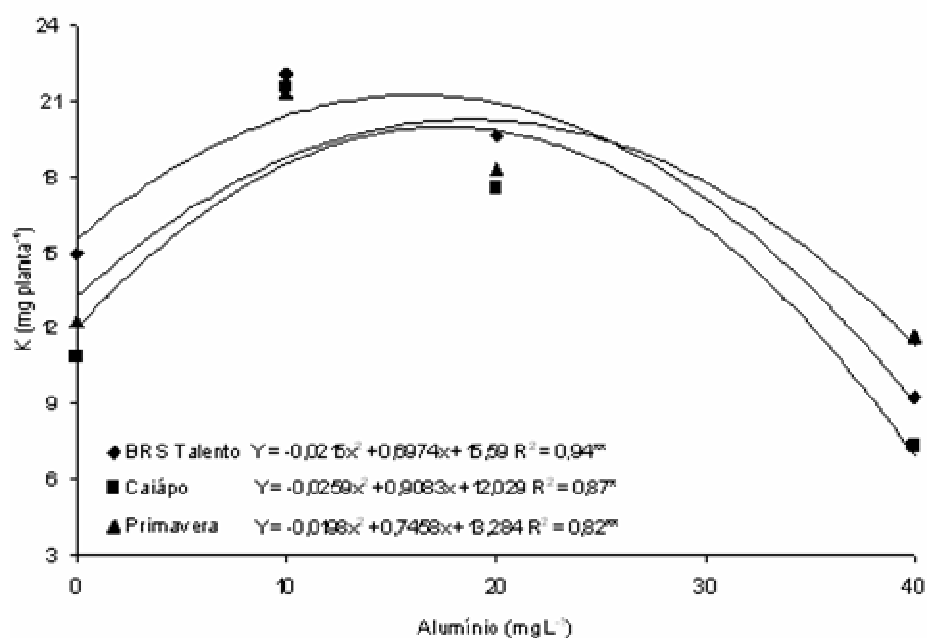


Figura 32. Potássio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

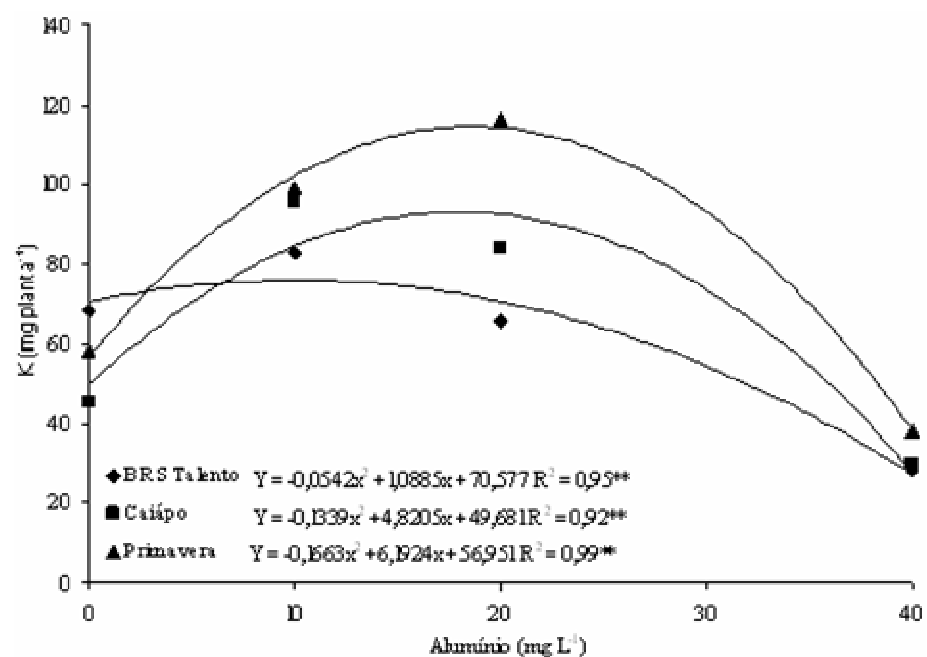


Figura 33. Potássio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

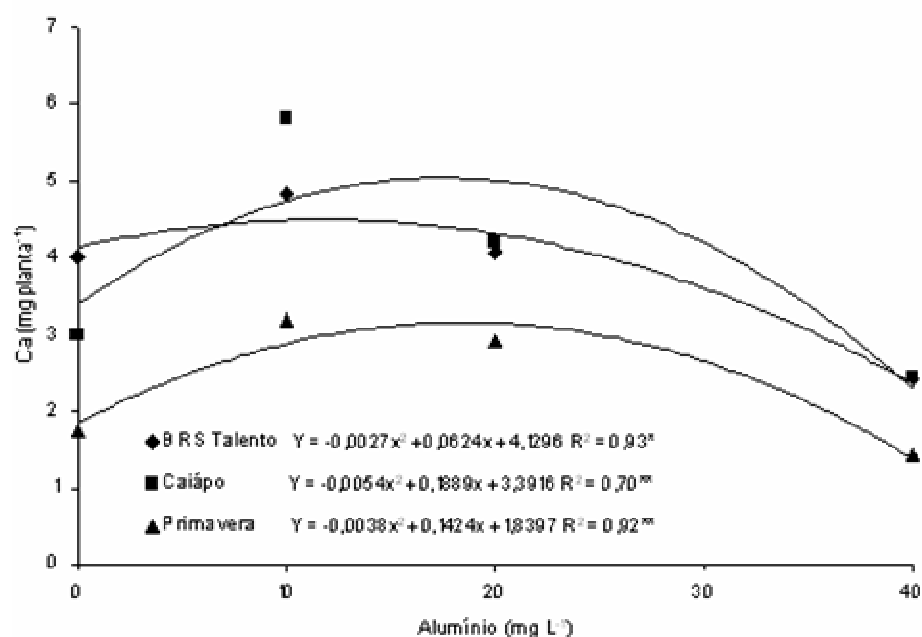


Figura 34. Cálcio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

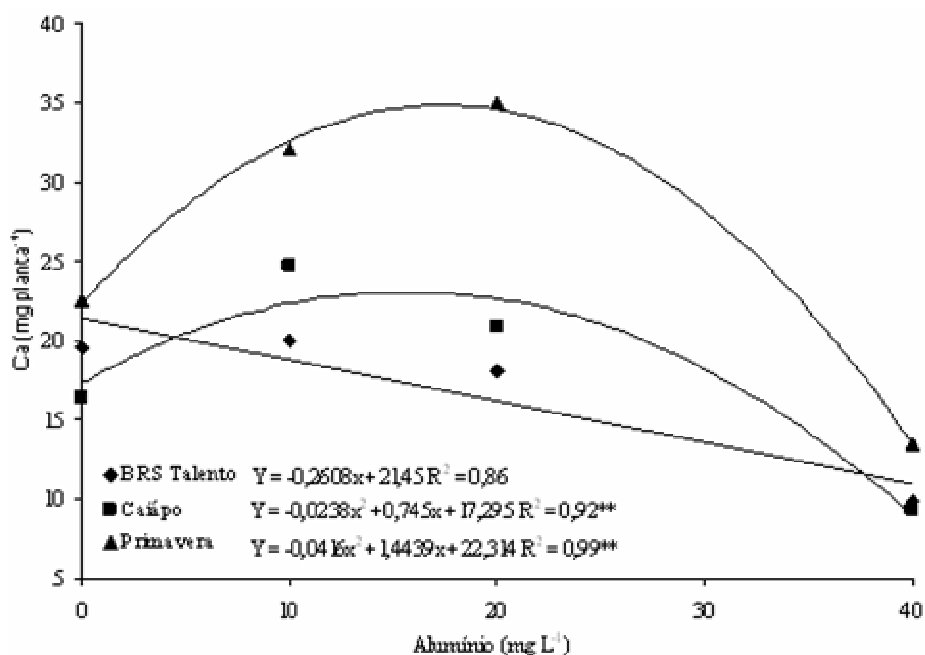


Figura 35. Cálcio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

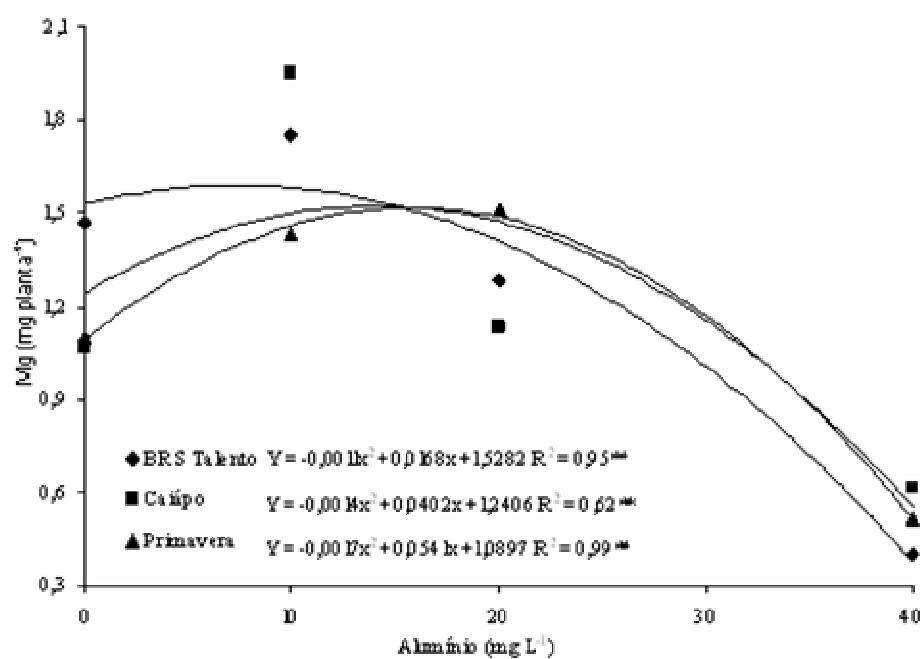


Figura 36. Magnésio acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

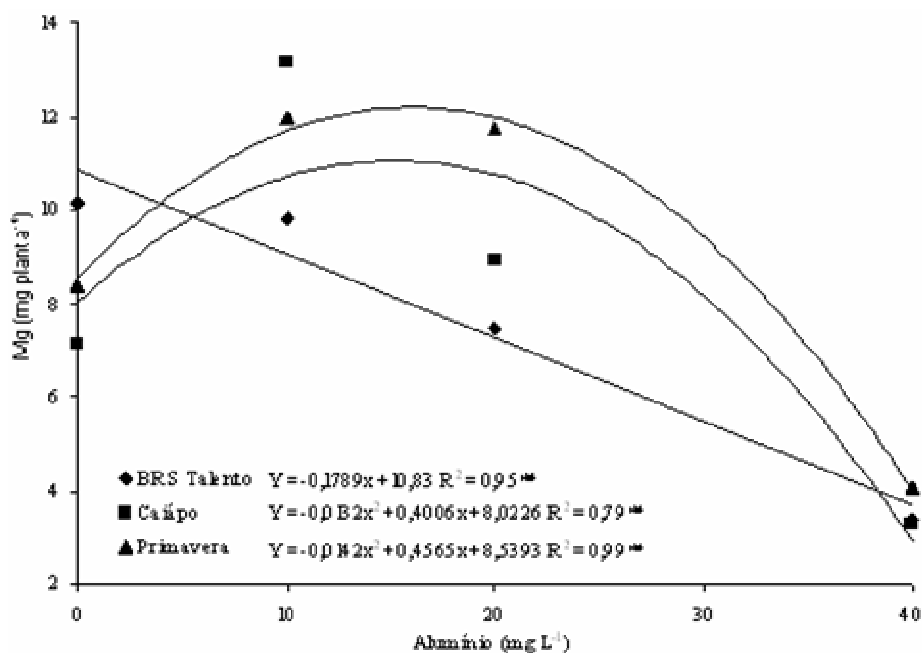


Figura 37. Magnésio acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

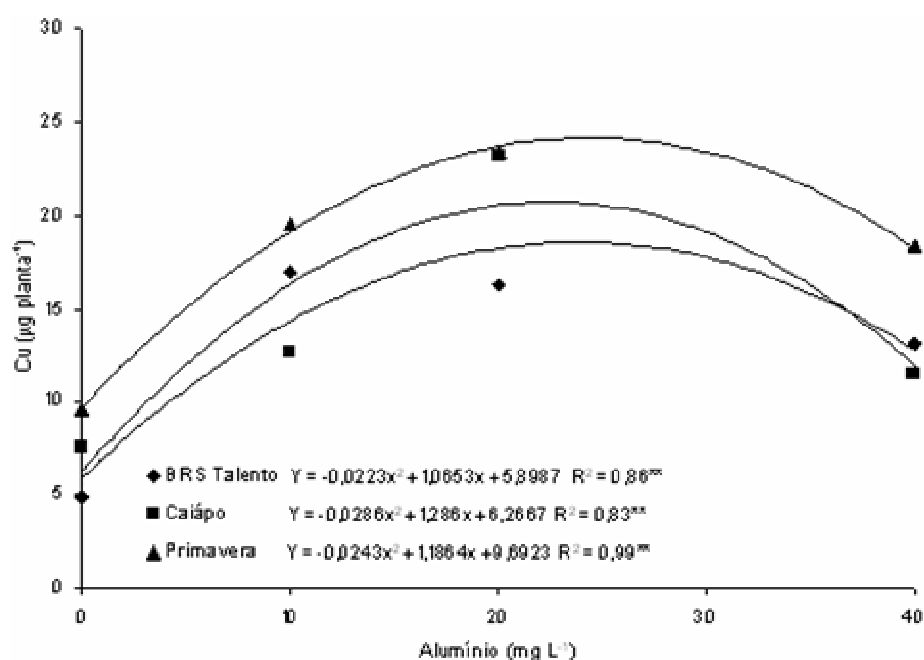


Figura 38. Cobre acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

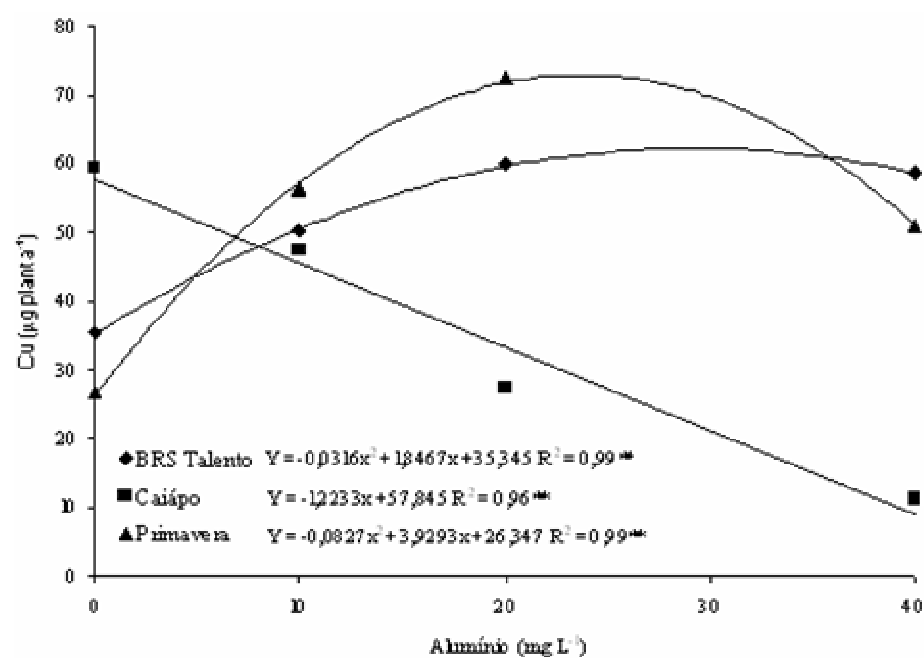


Figura 39. Cobre acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio

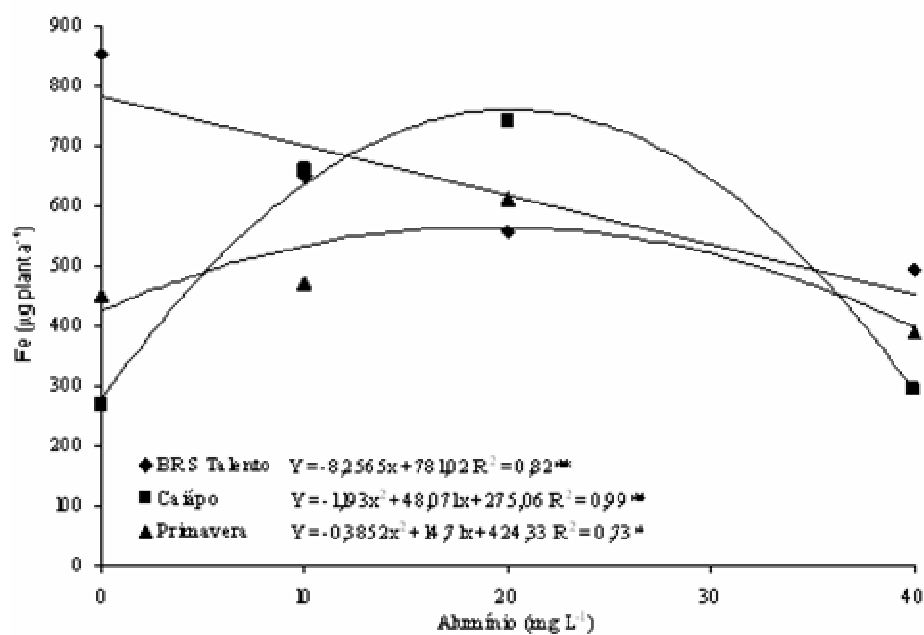


Figura 40. Ferro acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

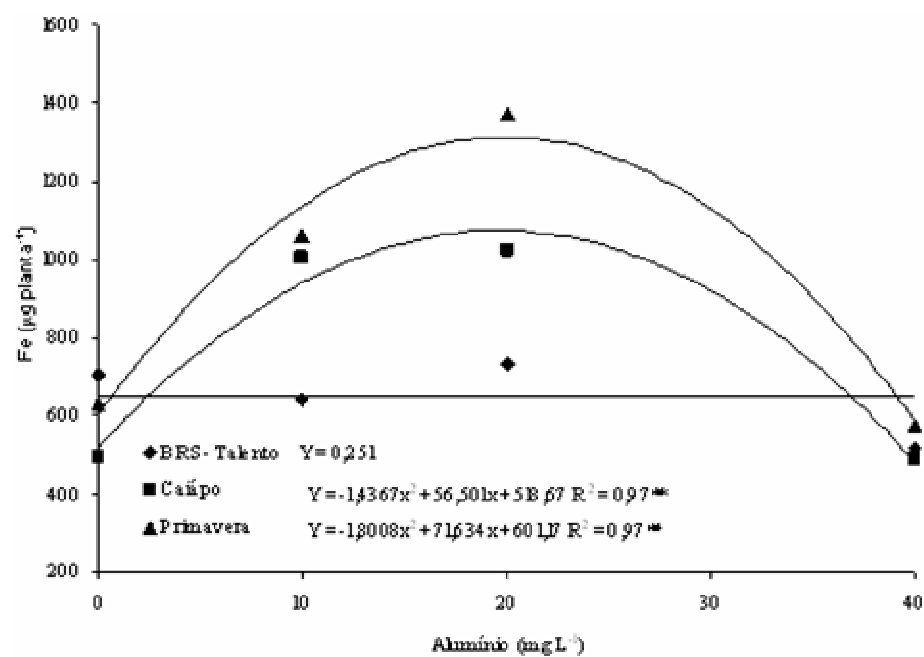


Figura 41. Ferro acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio

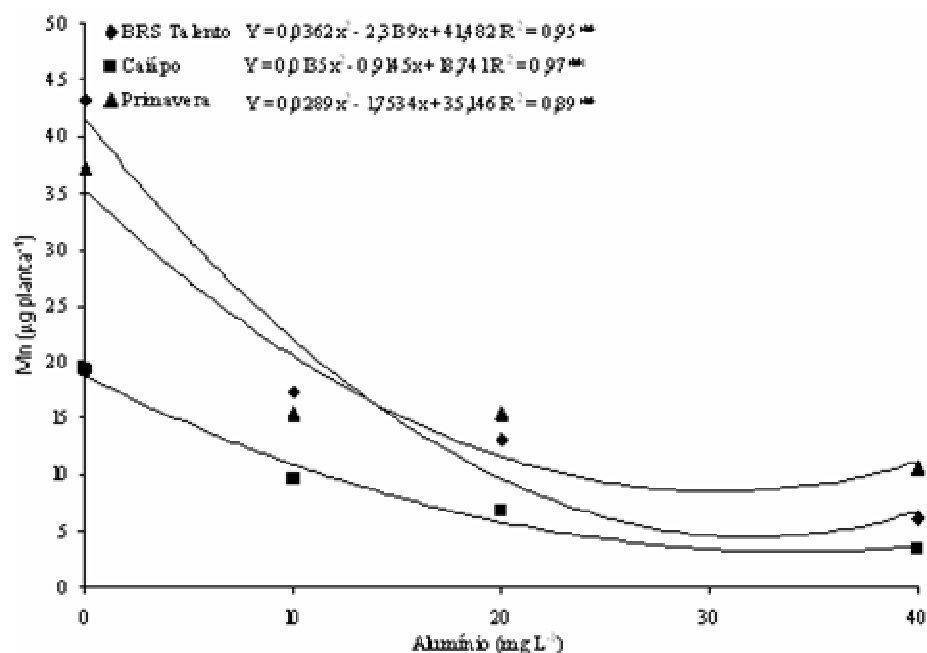


Figura 42. Manganês acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

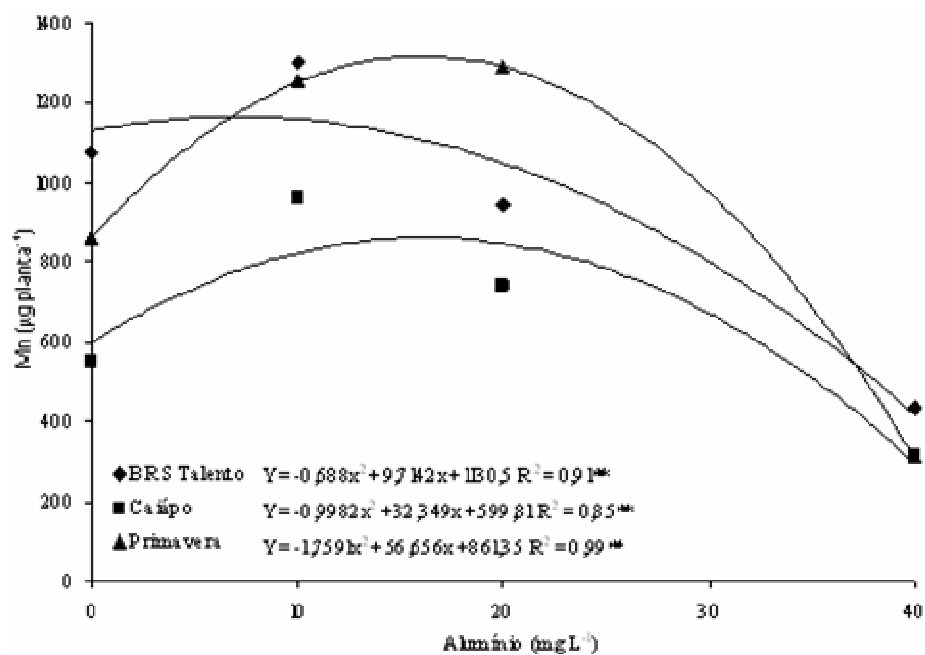


Figura 43. Manganês acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

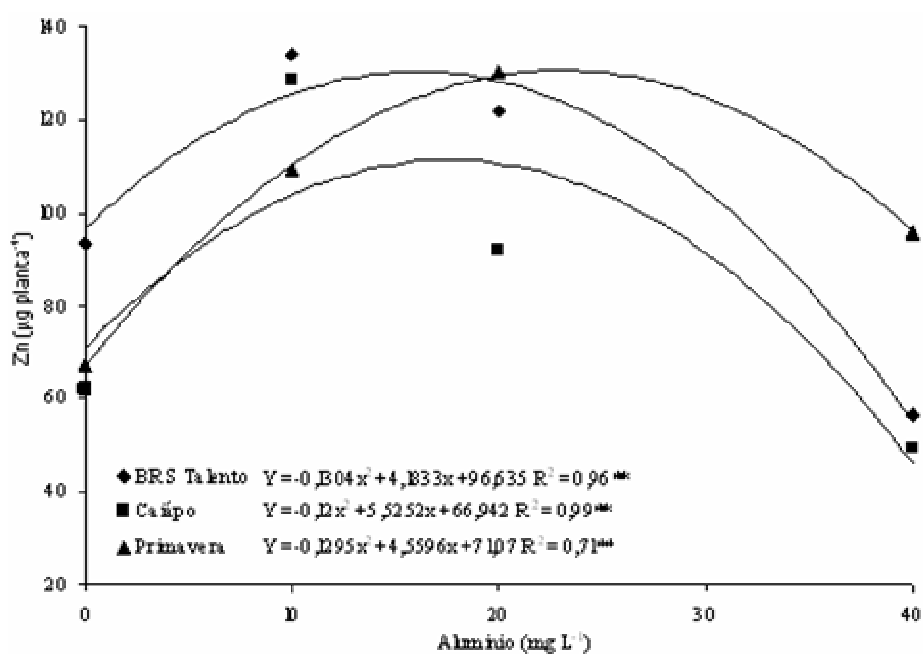


Figura 44. Zinco acumulado no sistema radicular de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

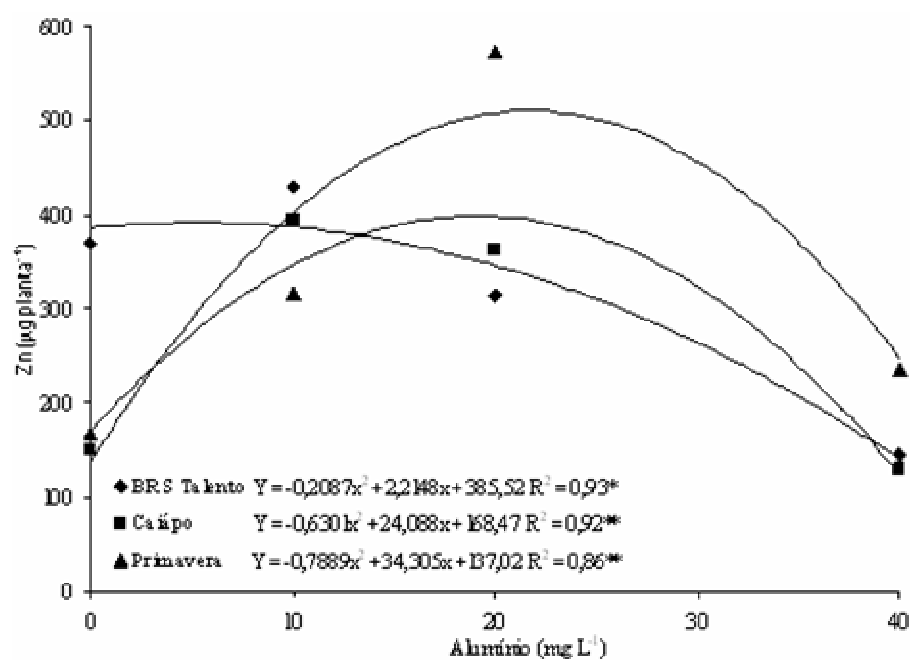


Figura 45. Zinco acumulado na parte aérea de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

6. 5. Quantidade absorvida de nutrientes, na parte aérea, por metro de raiz

Os resultados da análise de variância para a quantidade absorvida de nutrientes por metro de raiz estão contidos na Tabela 9. Verificou-se efeito significativo para cultivares exceto para Cu e Zn. Com relação aos níveis de alumínio nota-se efeito significativo em todas as variáveis, com exceção do Fe, e da interação entre os fatores para N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe e Mn.

Analizando os resultados de comparação de médias entre cultivares constatou-se apenas diferenças para N, P, K, Ca, Mg, Fe e Mn, na qual a BRS Talento apresentou a menor absorção por metro de raiz para todos os nutrientes citados, exceto para o Mn (Tabela 9).

As quantidades absorvidas de N (Figura 46), Ca (Figura 49), Mg (Figura 50) e Mn (Figura 53) por metro de raiz reduziram significativamente com o aumento dos níveis de alumínio apresentando efeito linear negativo, exceto para N e Ca na BRS Talento, que não foi alterado pelos dos níveis de alumínio. Na ausência do alumínio a Primavera apresentou maior absorção por metro de raiz de N, K, Ca, Mg, Fe e Mn e na Caiapó para P e Cu, sendo que, os menores resultados foram verificados na BRS Talento.

Mesmo com a redução na absorção de nutrientes por metro de raiz com o aumento dos níveis de alumínio, verificou-se que a Primavera demonstrou superioridade na absorção destes nutrientes por metro de raiz em comparação com as cultivares Caiapó e BRS Talento até o nível aproximado de $20 \text{ mg Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$. Porém, nos maiores níveis de Al^{3+} a cultivar Caiapó, apresentaram os melhores resultados evidenciando superioridade em condições de acidez.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Rengel & Robson (1989), Huang (1995), Rengel & Elliot (1992) e Kochian (1995), os quais observaram que alumínio em níveis elevados compete com os cátions por sítios de absorção dos transportadores de nutrientes e nos canais de influxo de cátions monovalentes e divalentes, reduzindo sua translocação para a parte aérea.

Resultados semelhantes foram obtidos em outras espécies vegetais como no sorgo (CALBO & CAMBRAIA, 1980), feijoeiro (SOUZA JÚNIOR et al., 1998),

goiabeira (SALVADOR et al, 2000), e em arroz (FAGERIA, 1985; MENDONÇA 2003; FREITAS et al. 2006)

Tabela 9. Quantidade de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco absorvidos por metro de raiz, no estágio de diferenciação floral de cultivares de arroz em função de doses de alumínio. Botucatu (SP) - 2005.

Cultivares	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg m ⁻¹					μg m ⁻¹			
BRS Talento	2,32b	0,37b	1,45b	0,42c	0,18b	1,40a	17,09b	22,25ab	7,51a
Caiapó	3,21a	0,51a	2,09a	0,61b	0,26a	1,32a	25,54a	21,72b	8,36a
Primavera	3,51a	0,58a	2,21a	0,75a	0,26a	1,47a	26,07a	26,85a	8,88a
Valor de F									
Cultivar (C)	16,84**	22,69**	21,18**	24,51**	13,78**	1,44 ^{ns}	14,14**	4,31*	1,71 ^{ns}
Dose de alumínio (Al ³⁺)	3,88*	52,55**	12,20**	6,88**	17,85**	8,77**	1,29 ^{ns}	12,89**	4,06*
C x Al ³⁺	3,74**	5,56**	2,45*	3,41**	2,48*	49,19**	2,67*	3,93**	1,53 ^{ns}
Valor de F para análise de regressão do fator alumínio									
R.L.	2,01 ^{ns}	118,82*	23,55**	24,51**	53,49**	2,43 ^{ns}	1,02 ^{ns}	37,57 ^{ns}	0,08 ^{ns}
R.Q.	1,37 ^{ns}	23,84**	12,92**	6,88**	0,01 ^{ns}	21,45**	0,97 ^{ns}	1,07**	10,92**
Cultivar BRS Talento									
R.L.	0,57 ^{ns}	5,98*	1,39 ^{ns}	0,06 ^{ns}	3,93*	111,28*	5,06*	1,88 ^{ns}	1,45 ^{ns}
R.Q.	0,61 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,15 ^{ns}	2,34 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Cultivar Caiapó									
R.L.	3,29*	71,08**	4,45*	5,61*	19,83**	122,66*	1,82 ^{ns}	4,77*	0,01 ^{ns}
R.Q.	0,95 ^{ns}	22,85**	2,92 ^{ns}	2,14 ^{ns}	0,07 ^{ns}	62,36**	0,07 ^{ns}	0,25 ^{ns}	4,75*
Cultivar Primavera									
R.L.	19,73**	64,04**	26,18**	29,26**	38,84**	10,41**	3,42 ^{ns}	49,84**	0,68 ^{ns}
R.Q.	2,04 ^{ns}	9,87**	11,62**	0,70 ^{ns}	0,41 ^{ns}	1,96 ^{ns}	3,86*	3,18 ^{ns}	10,98**
C.V. (%)	20,0,4	18,55	18,38	22,44	21,79	17,64	23,42	23,03	25,26

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

**, * e ns, significativo a 1% e 5%, e não significativo, respectivamente.

Quanto ao P (Figura 47), os níveis de alumínio reduziram significativamente a eficiência de absorção nas cultivares Caiapó, Primavera e BRS Talento. Esses resultados corroboram com as afirmações de Foy (1974), segundo o qual o excesso de

alumínio, além de inibir a formação normal das raízes, interfere nas reações enzimáticas e na absorção, transporte e uso de nutrientes pelas plantas.

Salvador et al. (2000), constataram que doses crescentes de alumínio reduzem a absorção e o transporte de P, Ca, Mg e Mn na parte aérea, sugerindo que a redução de Ca^{2+} e Mg^{2+} , deve-se a uma inibição interiônica desses cátions pelo alumínio.

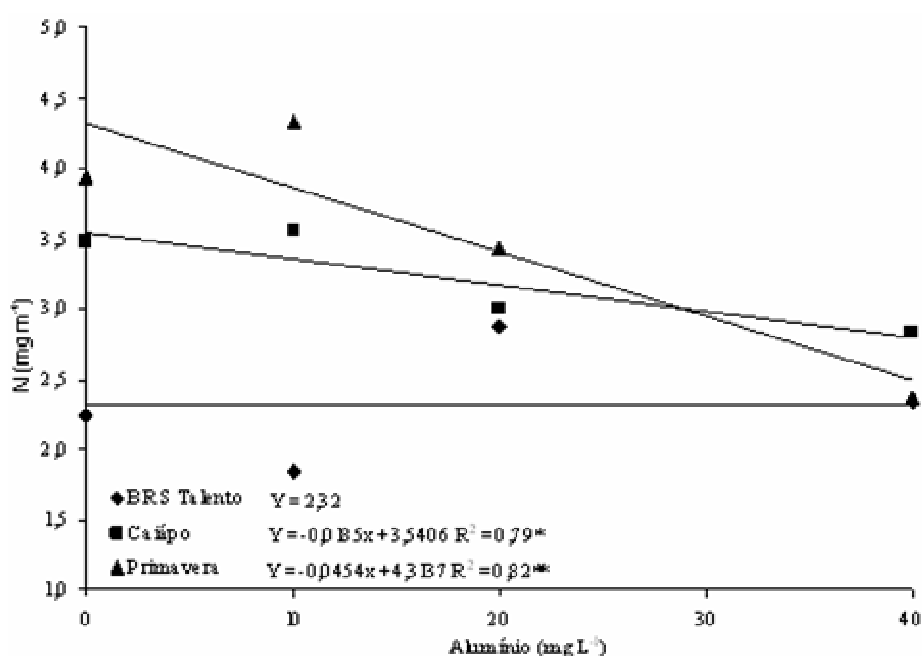


Figura 46. Nitrogênio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

A absorção de K (Figura 48) e Cu (Figura 51) por metro de raiz foi reduzida com o aumento dos níveis de alumínio na Caiapó, sendo o inverso observado na Primavera que foi a única responsiva para o K e Cu e na BRS Talento para Cu e para o K não foi afetada pelos níveis de alumínio. Quanto à quantidade absorvida de Fe (Figura 52) por unidade de raiz aumentou com a adição de alumínio nas cultivares Primavera e Caiapó, sendo que a BRS Talento não respondeu ao aumento dos níveis de alumínio. Esse aumento na absorção de Fe como hipótese de explicação, o fato da maior disponibilidade do ferro por

meio da hidrólise do Al e diminuição do pH e pela liberação do ferro adsorvido nos sítios metabólicos inativos dentro das raízes sendo este transportado para a parte aérea (FOY, 1974).

Com relação à quantidade absorvida de Zn (Figura 54) por metro de raiz, observa-se que não foi constatado efeito da interação entre os fatores, e sim para os níveis de alumínio como pode ser constatado na Tabela 9. Nota-se que os níveis de alumínio proporcionaram incremento de forma positiva e quadrática nas cultivares Caiapó e Primavera, sendo que, na BRS Talento não foi afetado pelos níveis de Al^{3+} . Na ausência de alumínio a cultivar BRS Talento apresentou a maior quantidade absorvida de Zn por metro de raiz, sendo o menor valor foi registrado na Primavera. Sob baixos níveis de alumínio a maior quantidade de Zn absorvido por metro de raiz foi verificado na Primavera até a dose de $22,13 \text{ mg Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$, sendo o menor valor verificado na BRS Talento.

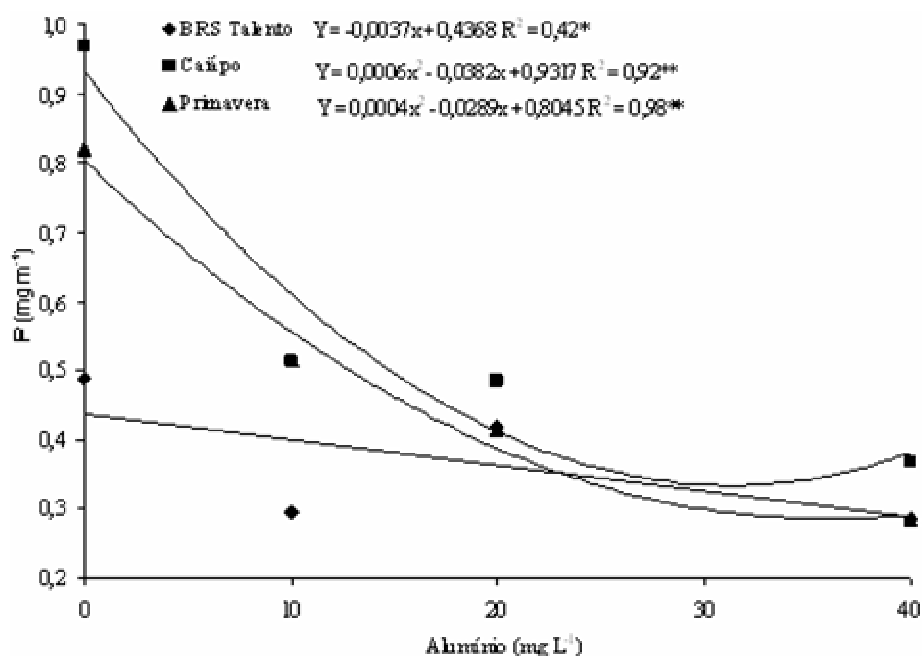


Figura 47. Fósforo absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

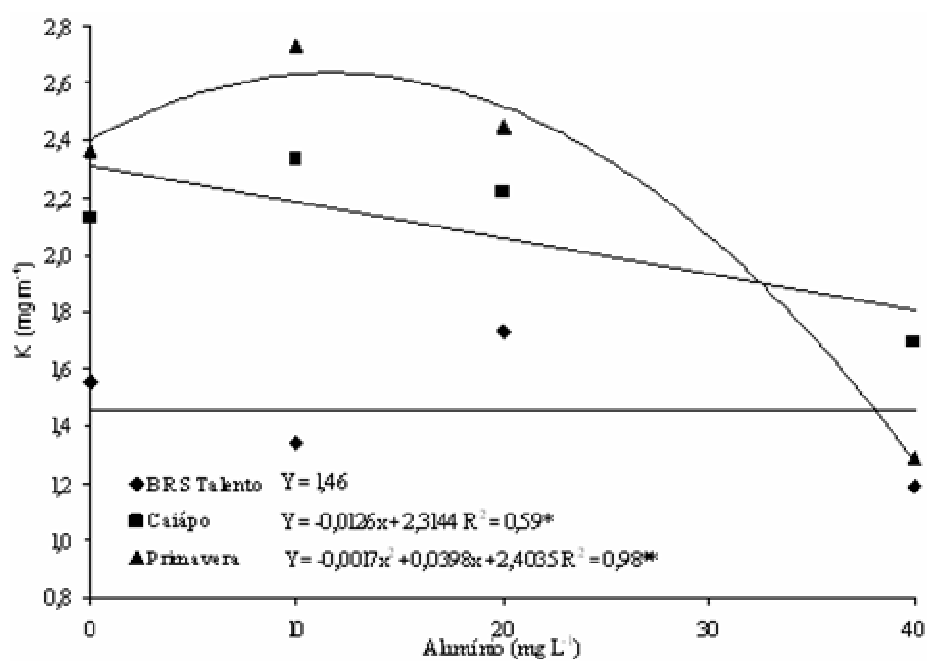


Figura 48. Potássio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

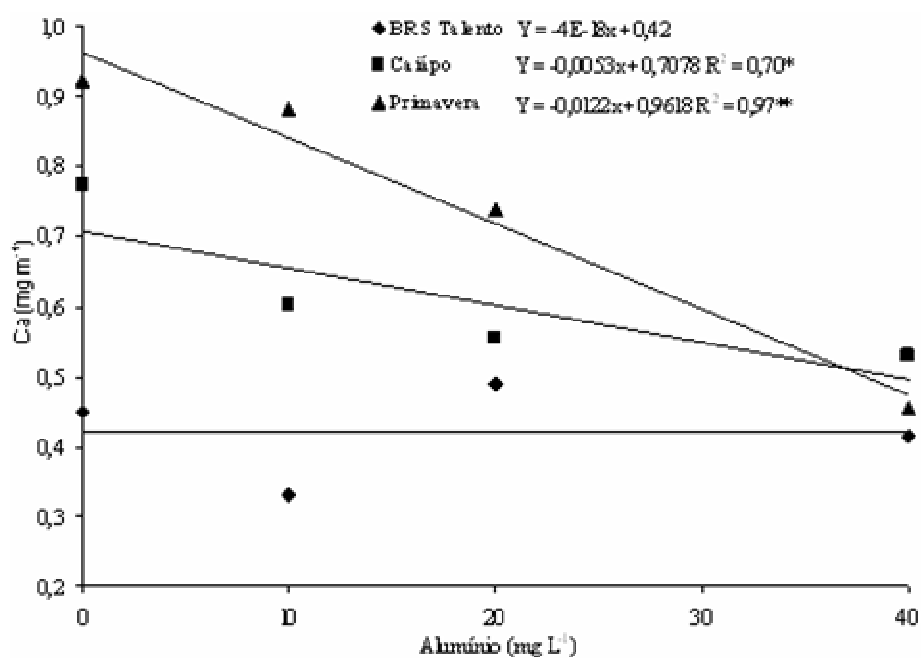


Figura 49. Cálcio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

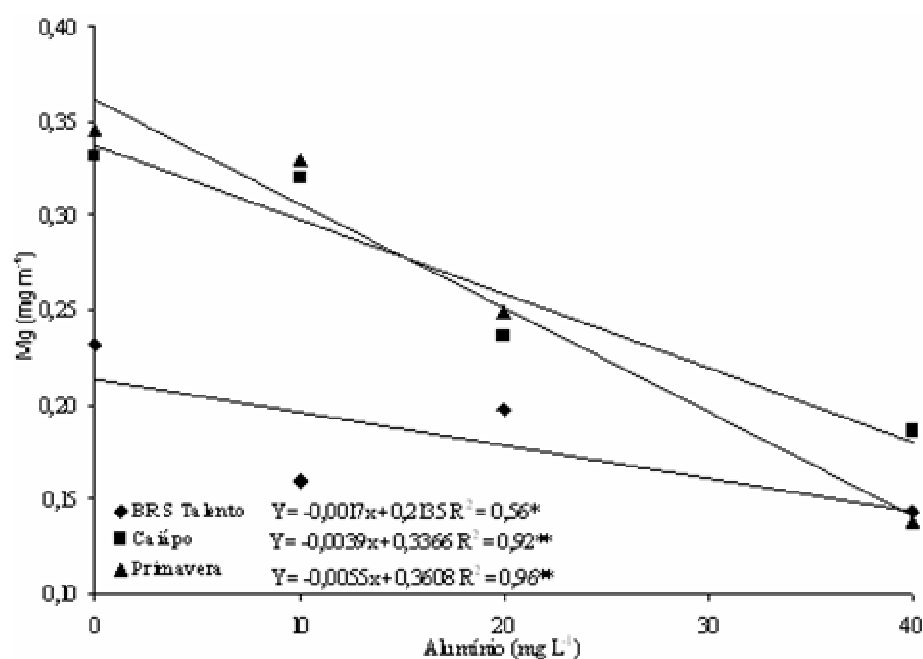


Figura 50. Magnésio absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

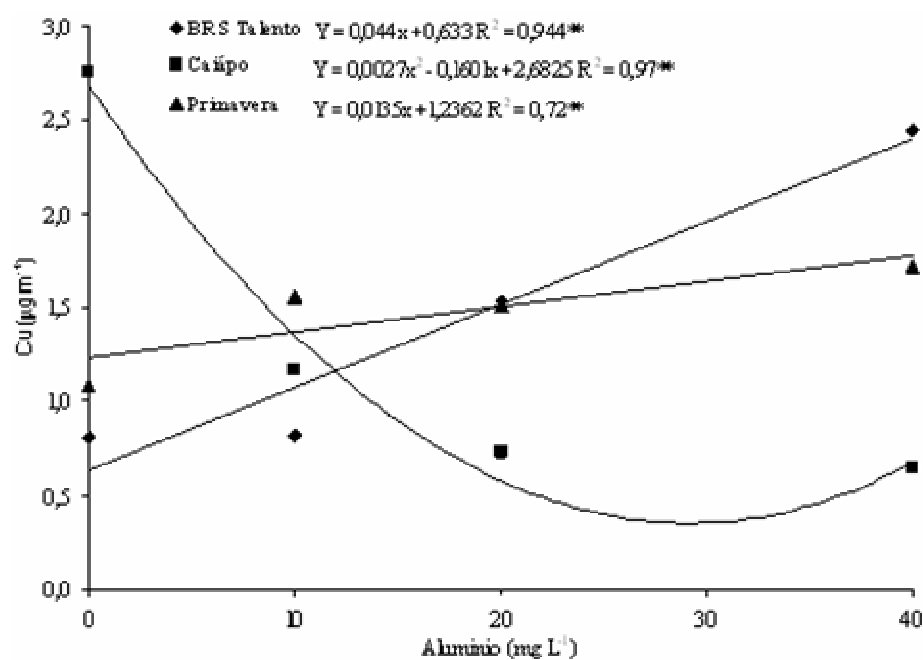


Figura 51. Cobre absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

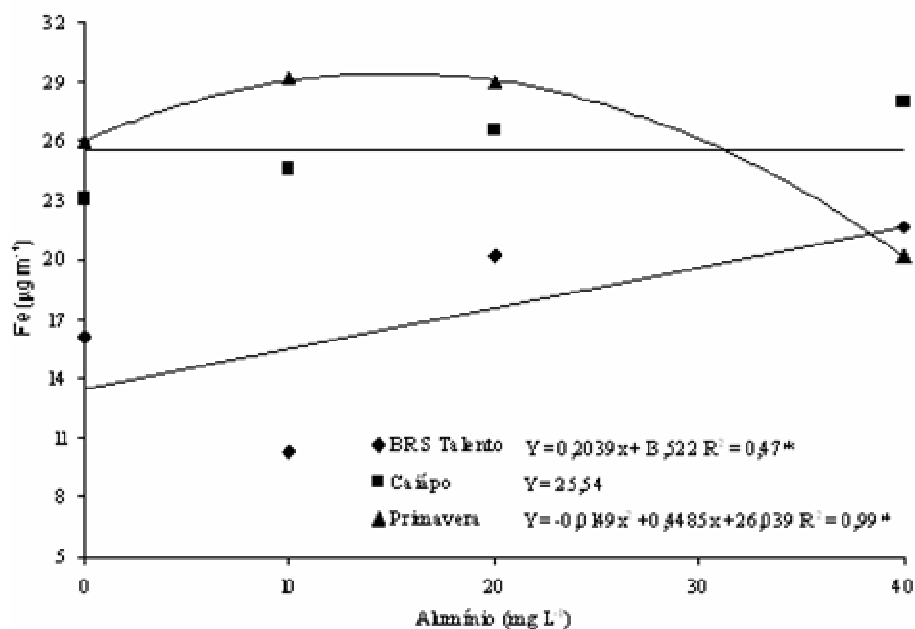


Figura 52. Ferro absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

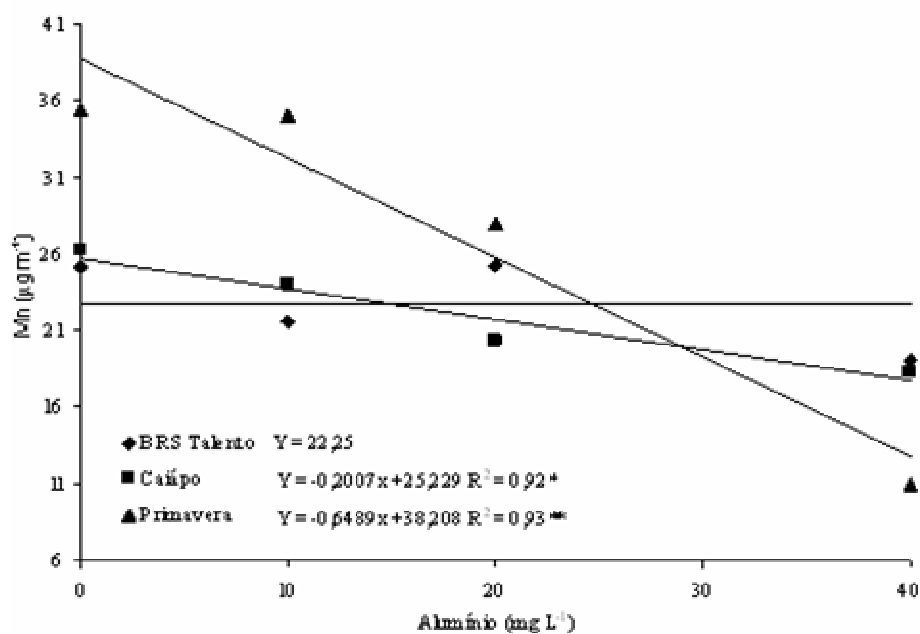


Figura 53. Manganês absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

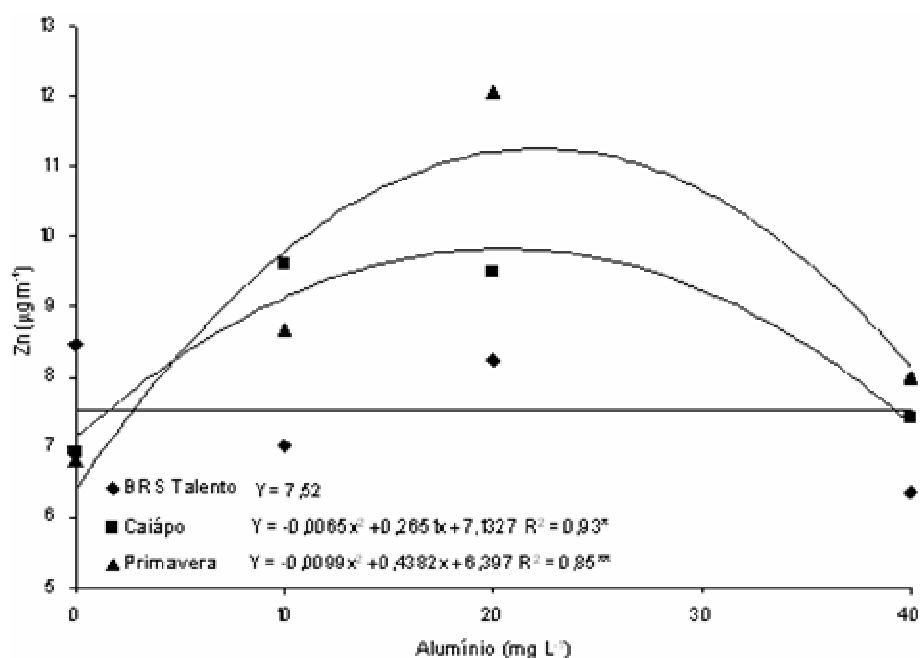


Figura 54. Zinco absorvido por metro de raiz de cultivares de arroz em razão dos níveis de alumínio.

Analisando os resultados pode-se inferir que a cultivar BRS Talento do grupo moderno, apresenta menor absorção de N, P, K, Ca, Mg e Fe por metro de raiz, entretanto, apresenta maior comprimento radicular (Figuras 1). Os resultados apresentados pelas cultivares estão diretamente relacionados às características genéticas.

Nota-se ainda, que na dose de 40 mg Al³⁺ L⁻¹, a cultivar Caiapó apresentou as maiores quantidades absorvidas de P, K, Ca, Mg, e Fe por metro de raiz. Estes resultados podem estar relacionados às características genéticas da Caiapó que pertence ao grupo Tradicional, pois estas cultivares são rústicas, e foram selecionadas para solos com baixos níveis de fertilidade, além de apresentar tolerância a seca, e maior estabilidade de produção de grãos (FORNASIERI FILHO & FORNASIERI 1993; TERRES et al., 2004).

7. CONCLUSÕES

- As cultivares dos grupos intermediário, tradicional e moderno apresentaram, respectivamente, a seguinte ordem decrescente de tolerância ao alumínio: Primavera > Caiapó > BRS Talento;

- O sistema radicular, a massa seca das raízes, da parte aérea e total são bons indicadores de tolerância ao Al^{3+} ;

Sob baixas doses de alumínio as cultivares de arroz aumentaram a produção de matéria seca da raiz e da parte aérea;

O alumínio provocou mudanças significativas na nutrição das cultivares de arroz avaliadas;

- Níveis tóxicos de Al^{3+} , interferem no transporte de P, K, Ca, Mg e Mn para a parte aérea;
- O P, Mg e Mn são os nutrientes menos acumulados pelo arroz sob estresse de Al^{3+} ;
- A eficiência de absorção do sistema radicular fica comprometida pelo estresse de Al^{3+} , principalmente para o P e Mg;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREW, C. S., JOHNSON, A. D., SANDLAND, R. L. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. **Journal Agriculture**, v.24, p.325-339, 1973.

ANTUNES, A. M. G., NUNES, M. A. Effects of aluminum on nutrients solution pH and nitrate/ammonium uptake by triticale. **Jornal of Plant Nutrition**, v.20, p.1391-1401, 1997.

BABER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. Wilelley Inerscience Publishers, New York, 1984, 134p.

BARCELLOS, A. O. Sistemas extensivos e semi-intensivos de produção: pecuária bovina de corte nos cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8, 1996, Brasília. **Anais.....** Brasília, 1996, p.130-136.

BLAMEY, F. P. C., ROBINSON, N. J., ASHER, C. J. Interspecific differences in aluminium tolerance in relation to root cation-exchange capacity. **Plant and Soil**, v.146, p.77-82, 1992.

BOHNEN, H. Acidez do solo: origem e evolução. In: KAMINSKI, J. (Coord.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.9-19 (Boletim, 4).

BRESEGHELLO, F., CASTRO, E. M., MORAIS, O. P. Cultivares de arroz. In: BRESEGHELLO, F., STONE, L. F. **Tecnologia para arroz de terras altas**: Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 1998, p.41-53.

BRONDANI, C., PAIVA, E. Análise de RFLP da tolerância à toxidez do alumínio no cromossomo 2 do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.8, p.575-579, 1996.

CALBO, A. G., CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Revista Ceres**, v.27, n.152, p.369-378, 1980.

CAMARGO, C. E. O. A concentração de fósforo na tolerância de cultivares de trigo e toxicidade de alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, v.44, n.1, p.49-64, 1985.

CAMARGO, C. E. O., PEREIRA FILHO, A. W. P., FREITAS, J. G. Avaliação de genótipos de centeio, triticale e trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Scientia Agrícola**. v.55, n.2, p.227-232, 1998.

CAMBRAIA, J., SILVA, M. A., CANO, M. A. O. SANT'ANNA, R. Método simples para avaliação de cultivares de sorgo quanto á tolerância ao alumínio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.3, p.87-95, 1991.

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.

CIOTTA, M. N., ERNANI, P. R., FORTONATO, S. M. V., ALBUQUERQUE, J. A., WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1055-1064, 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. In: Arroz Brasileiro: (<http://www.arroz.agr.br/site/arrozemfoco/061114.php>). Acesso em 20 de dezembro de 2006.

CRUSCIOL, C. A. C., MAUAD, M., ALVAREZ, R. C. F., LIMA, E. V., TIRITAN, C. S. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, v.64, n.4, p.643-649, 2005.

DELHAIZE, E., RYAN, P. Update on environmental stress: aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**. v.107, n.2, p.315-321, 1995.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Arroz de terras altas. Santo Antonio de Goiás, [2001]. Folder.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. In: Cultivares de arroz: (<http://www.cnpaf.embrapa.br/pesquisa/brstalentto.htm>). Acesso em 10 de dezembro de 2006.

FAGERIA, N. K. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition of two rice cultivars at different growth stages. **Plant and Soil**, v.85, p.423-429, 1985.

FAGERIA, N. K. Tolerância diferencial de cultivares de arroz ao alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 171, p.1-9, 1982.

FAGERIA, N. K., CARVALHO, J. R. P. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in upland rice cultivars. **Plant and Soil**, v.69, p.31-44, 1992.

FAGERIA, N. K., SANTOS, A. B. Rice and common bean growth and nutrient concentration as influenced by aluminum on acid lowland soil . **Journal of Plant nutrition**, v.2, n.5, p.903-12, 1998.

FAGERIA, N. K., STONE, L. F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42p.

FAGERIA, N. K., WRIGHT, R. J., BALIGAR, V. C. Rice cultivars response to aluminum in nutrient solution. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1133-1142, 1988.

FERNANDES, M. S., ROSSIELO, R. O., ARRUDA, M. L. R. Relações entre capacidade de troca de cátions das raízes e toxidez de alumínio em duas gramíneas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.6, p.631-637, 1984.

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.

FORNASIERI FILHO, D., FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal. FUNEP, 1993. 221p.

FOY, C. D. Effect of aluminum on plant growth. In: CARSON, F. W. (Ed.) **The plant root its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974, p. 601-642.

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

FREIRE, L. R., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., FERNANDES, M. S., RIBEIRO, M E. S., SANTOS, J. C. P. Efeito de alumínio nas raízes de arroz cultivado em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.22, p.459-464, 1987.

FREITAS, F. A., KOPP, M. M., SOUSA, R. O., ZIMMER, P. D., CARVALHO, F. I. F., OLIVEIRA, A. C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, v.36, n.1, p.72-79, 2006.

FURLANI, P. R., FURLANI, A. M. Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas. **Boletim Técnico Agrônômico**, v.121, p.21-26, 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.

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.

GUIMARÃES, E. P; SANT`ANA, E. P. Sistema de cultivo. In: VIEIRA, N. R., SANTOS, A. B., SANT`ANA, E. P. (Coords.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999, p.17-35.

HARPER, J. L., JONES, M., SACKVILLE-HAMILTON, N. R. The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. In: ATKINSON, D. (Ed.). **Plant root growth: Ecological Perspective**. Oxford: Blackwell, 1991, p.3-22.

HELYAR, K. **Manejo da acidez do solo a curto e a longos prazos**. Piracicaba: Potofos, 2003. 12p. (Encarte Técnico, 104)

HUANG, J. W., BARCHELARD, E. P. Effects of aluminum on growth and cation uptake in seedlings of *Eucalyptus mannifera* and *Pinus radiata*. **Plant and Soil**, v.121-127, 1993.

HUANG, J. W. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.46, p.237-260, 1995.

JEAN, F., PETTERSSON, S. Varietal diversity of upland rice in sensitivity to aluminium. **Journal of Plant nutrition**, v.12, n.9, p.973-993, 1989.

JONES, D. L., KOCHIAN, L. V., GILROY, S. Aluminum induces a decrease in cytosolic calcium concentration in BY-tobacco cell cultures. **Plant Physiology**, v.116, n.1, p.81-89, 1998.

JUSTINO, G. C., CAMBRAIA, J., OLIVA, M. A., OLIVEIRA, J. A. Absorção e redução de nitrato em duas cultivares de arroz na presença de alumínio, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.8, p.1285-1290, 2006.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.4, p.237-260, 1995.

LARSEN, P. B., DEGENHARDT, J., TAI, C., STENZLER, L. M., HOWELL, S. H., KOCHIAN, L. V. Aluminum-resistant *Arabidopsis* mutants that exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. **Plant Physiology**, v.117, p.9-17, 1998.

LIEBING, G. F. Jr., VANSELOW, A. P., CHAPMAN, H. D. Effects of aluminum on copper toxicity, as revealed by solution culture and spectrographic studies of citrus. **Soil Science**, v.53, p.341-351, 1942.

LONDOÑO, M. E. A., VELENCIA, A. G. Toxicidade de alumínio em plantas de café. **Cenicafé**, v.34, p.61-97, 1983.

LUCHESI, E. B., FAVERO, L. O. B., LENZI, E. **Fundamentos de química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001, 182p.

MACEDO, C., KINET, J. M., SINT JAN, V. van. Effects of durationnnn and intensity of aluminum stress on growth parameters in for rice gernotypes differing im aluminum sensitivity. **Journal of Plant Nutrition**, v.20, n.1, p.181-193, 1997.

MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: principio e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Patafós, 1997. 315p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1980, 215p.

MALAVOLTA, E., KLIEMANN, H. J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Piracicaba: Potafós, 1985, 136p.

MALKANTHI, D. R. R., YOKOYAMA, K., YOSHIDA, T., MORISTSUGU, M., MATSUSHITA, K. Effects of low pH and Al on growth and nutrient uptake of several plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.41, p.161-165, 1995.

MARCKLON, A. E. S., SIM, A. M. odifying effects of a non-toxic level of aluminium on phosphate fluxes and comartmentation in root córtex of intact ryegrass seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v.43, n.256, p.1483-1490, 1992.

MARION, G. M., HENDRICKKS, D. M., DULL, G. R., FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, v.121, p.76-85, 1976.

MARSCHINER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2a ed. London: Academic Press, 1995. 889p.

MASCARENHAS, H. A. A., CAMARGO, C. E. O., FALIVENE, S. M. P. Efeito do alumínio sobre o crescimento de raízes, peso seco da planta e raízes de diferentes cultivares de soja. **Bragantia**, v.43, p.191-200, 1995.

MATEUS, G. P. **Utilização agropecuária do sorgo de guiné e efeitos na cultura da soja atributos químicos do solo**. Botucatu, 2003. 142p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

MATSUMOTO, H., HIRASAWA, F., TORIKAL, H. Localization of absorbet aluminium in peã root its binding to nucleic acid. **Plant and cell physiology**, v.17, n.1, p.627-631, 1976.

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, J. R., CAMBRAIA, J., OLIVEIRA, A. J. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.7, p.843-848, 2003.

MENDONÇA, M. L. S. **Estudos dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípicas em arroz (*Oryza sativa* L.)**. Seropédica, 1991. 171p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro “UFRRJ”.

MENGEL, K., KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4 ed. Bern: International Potash Institute, 1987, 687p.

NOGUEIRA, S. S., NAGAI, V., CARRELLI, M. L. C., FAHL, J. J. Comportamento de porta enxertos de citros em presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.6, p.711-7016, 1989.

OSMOND, C. B., BJÖRKMAN, O., ANDERSON, D. J. **Physiological processes in plant ecology**. New York: Springer Verlag, 1980, p.61.

PAVAN, M. A., OLIVEIRA, E. L. **Manejo da acidez do solo**. Londrina: IAPAR, 1997, p.86. (IAPAR. Circular, n.95)

PINHEIRO, B. S. Características morfofisiológicas da planta relacionada à produtividade. In: **A cultura do arroz no Brasil**: Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 1999, p.116-147.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 111p.

RATTER, J. A., RIBEIRO, J. F. Biodiversity of flora of the Cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, 8, 1996, Brasília. **Anais.....** Brasília, 1996, p.3-5.

RENGEL, Z. Uptake of aluminium by plant cells. **New Phytol.** v.116, p.389-406, 1996.

RENGEL, Z., ROBISON, D. L. Competitive Al^{3+} inhibition of net Mg^{2+} uptake by intact *Lolium multiflorum* roots. **Plant Physiology**, v.91, n.4, p.1407-1413, 1989.

RENGEL, Z., ELLIOT, D. C. Mechanism of aluminum inhibition of net $^{45}\text{Ca}^{2+}$ uptake by *Amaranthus* protoplasts. **Plant Physiology**, v.98, p.632-638, 1992.

ROSOLEM, C. A. **Brasil**: acid soils and agriculture. 1990. 4p. (documento apresentado antes do International steering Committee of the Symposium Plant-Soil International at Low pH, Beckerly, USA, 24-29 June).

ROSOLEM, C. A. **Relação solo-planta na cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 53p.

SALVADOR, J. O., MOREIRA, A., MALAVOLTA, E., CABRAL, C. P. Influência 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, C. H. **Influência de diferentes níveis de alumínio no desenvolvimento de dois porta-exertos cítricos em cultivo hidropônico**. Botucatu, 1998, 134p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

SASAKI, M., YAMAMOTO, Y., MATSUMOTO, H. Lignin deposition by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Plant Physiology**. v.96, n.2, p.193-198, 1996.

SIEGEL, N., HAUG, A. Calmodulin-dependent formation of membrane potential in barley root plasma membrane vesicles: a biochemical model of aluminum toxicity in plants. **Physiologia Plantarum**, v.59, n.2, p.285-291, 1983.

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

SILVA, A. A. **Toxicidade de alumínio em trinta genótipos de *Panicum maximum* Jacq. cultivados em solução nutritiva**. Piracicaba, 1997, 146p. Dissertação (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SILVA, J. B. C., NOVAIS, R. F., SEDIYAMA, C. S. Comportamento de genótipos de soja em solos com alta saturação de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.3, p.287-289, 1984.

SILVA, L. M. **Crescimento radicular e nutrição mineral de cultivares de feijão em resposta a calagem**. Botucatu, 2002, 70p, Dissertação (Mestrado em Agricultura), Faculdade de Ciência Agronômica, Universidade Estadual Paulista, 'Júlio de Mesquita Filho'.

SIVAGURU, M., JAMES, M. R., ANBUDURAI, P. R., BALAKUMAR, T. Characterization of differential aluminum tolerance among rice genotypes cultivated in south india. **Journal of Plant Nutrition**, v.15, p.236-246, 1992.

SIVAGURU, M., PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars – II mechanism of aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, v.16, p.1717-1732, 1993.

SOARES, A. A., REIS, M. S., SOARES, P. C. Caiapó, nova opção de arroz de sequeiro para Minas Gerais. **Revista Ceres**, v.40, p.513-517, 1993.

SOUZA JÚNIOR, J. O., NASCIMENTO, C. W. A., MARTINEZ, H. E. P. Resposta do feijoeiro cultivado em solução nutritiva à níveis de cálcio e magnésio na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.7, p.48-53, 1998

SUHYDA, C. G., HAUG, A. Citrate chelation as a potential mechanism against aluminum toxicity in cells: the role of calmodulin. **Canadian Jornal of Biochemistry and Cell Biology**, v.63, p.1167–1175, 1985.

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAYLOR, G. J. The physiology of aluminium tolerance in higher plant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1179-1194, 1988.

TECCHIO, M. A. **Doses crescentes de alumínio no desenvolvimento de porta-exerto de videira cultivado em solução nutritiva**. Botucatu, 2003, 134p. Dissertação (Mestrado em

Agronomia/Horticultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

TENNANT, D. A. A test of a modified lime intersect method of estimating root length. **Journal Ecology**, v. 63, p.995-1001, 1975.

TEO, Y. H., BEYROUTY, C. A., NORMAN, R. J., GIBUR, E. E. Nutrient uptake relationship to root characteristics of rice. **Plant Soil**, v.171, p.297-302, 1995.

TERRES, A. L. S., FAGUNDES, P. R. R., MACHADO, M. O., MAGALHÃES JUNIOR, A. M., NUNES, C. D. M. Melhoramento genético e cultivares de arroz irrigado. In: GOMES, A. S., MAGALHÃES JUNIOR, A. M. (Eds). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, p.161-226.

TIFFNEY, B. H., NIKLAS, K. J. Clonal growth in land plants: a palaeobotanical perspective. In: JACKSON, J. B. C., BUSS, L. W., COOK, R. E. (Eds.). **Population biology and evolution of clonal organisms**. New Haven: Yale University Press, 1985, p.35-66.

VASCONCELOS, L. A. B. C. **Comportamento de porta-enxerto de citros (Citrus spp) em três tipos de solos com diferentes níveis de alumínio e manganês**. Piracicaba, 1997. 128p. Dissertação (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VASCONCELOS, S. S., ROSSIELLO, R. O. P., JACOBINE NETO, 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.01-06, 2000.

VENEGAS, V. H. A., MELLO, J. W. V. DIAS, L. E. **Curso de fertilidade e manejo dos solos - Módulo 4 – Acidez do solo**. ABEAS/UFV, 1995, 68p.

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**, v.33, n.1, p.09-15, 1998.

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

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

ZEIGLER, R. S., PANDEY, S., MILES, J., GOURLEY, L. M., SARKARUNG, S. Advances in the selection and breeding of acid-tolerant plants: rice, maize sorghum and tropical forages. In: DATE, R. A., GRUNDON, N. J., RAYMENT, G. E., PROBERT, M. E. (Eds). **Plant-soil interatíons at low pH: principles and management**. Kluwer academic, 1995, p.391-406.