

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

**INTERAÇÃO SILÍCIO E ALUMÍNIO EM PLANTAS DE ARROZ DE  
TERRAS ALTAS E MAMONA**

**LUCAS BARBOSA DE FREITAS**

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

BOTUCATU – SP  
Janeiro de 2015

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

**INTERAÇÃO SILÍCIO E ALUMÍNIO EM PLANTAS DE ARROZ DE  
TERRAS ALTAS E MAMONA**

**LUCAS BARBOSA DE FREITAS**

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

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

BOTUCATU – SP  
Janeiro de 2015

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

F866i Freitas, Lucas Barbosa de, 1984-  
Interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas e mamona / Lucas Barbosa de Freitas. - Botucatu : [s.n.], 2015  
xv, 132 f. : ils. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015  
Orientador: Dirceu Maximino Fernandes  
Inclui bibliografia

1. Arroz. 2. Lignina. 3. Compostos fenólicos. 4. Plantas - Efeito do alumínio. 5. Plantas - Efeito do silício. I. Fernandes, Dirceu Maximino. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. III. Título

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

TÍTULO: "INTERAÇÃO SILÍCIO E ALUMÍNIO EM PLANTAS DE ARROZ DE  
TERRAS ALTAS E MAMONA"

ALUNO: LUCAS BARBOSA DE FREITAS

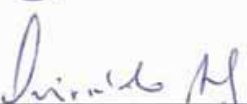
ORIENTADOR: PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS

  
\_\_\_\_\_  
PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> ROSEMARY MARQUES DE A. BERTANI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ORIVALDO ARF

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ADALTON MAZETTI FERNANDES

Data da Realização: 20 de janeiro de 2.015.

Aos meus pais, *Glêide Barbosa e Diorande Freitas*,  
À minha avó, Davina Gouveia de Assis,  
Pelo amor, suporte e ensinamentos durante toda minha vida.

À Suelen Maia

Pelo amor, compreensão, dedicação, companheirismo e ensinamentos em todos os momentos de nossas vidas.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe Glêide e meu pai Diorande, pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pela orientação, ensinamentos, paciência, apoio, compreensão, amizade e pelo exemplo de caráter e pessoa.

À Suelen Cristina Mendonça Maia, pelo apoio, carinho, amor, compreensão, paciência e ajuda na execução deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado (Processo nº 2011/09283-0) e projeto de auxílio regular à pesquisa (Processo nº 2011/22182-8).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos concedida (PDSE) para estágio de doutoramento nos Estados Unidos (Processo nº 6114-13-0).

À Louisiana State University, especialmente à Prof. Dra. Brenda S. Tubaña, por minha aceitação, orientação, compreensão, paciência e ensinamento durante meu estágio de doutorado no exterior.

Aos amigos Brandon White, Tapasya Babu, Payton Dupree e Yamid Sanabria, pela amizade, companheirismo e ajuda durante todo período de convívio nos Estados Unidos.

Aos amigos, Laércio Pivetta, Laerte Pivetta, Flavio Gurgacz e Samuel Fiorezi pela amizade, apoio, companheirismo e auxílio nos trabalhos de campo e processamento das amostras.

Às estagiárias Arianne Moniz e Beatriz Mazziero, pelo valioso auxílio na realização desse trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, pelo auxílio direto e indireto no trabalho, em especial aos funcionários José Carlos, Silvia, Adriana, De Piere, Adilson, Noel, Jair e Pedro. E, aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal (Agricultura) Valéria, Dorival e Vera.

A todo o corpo docente da pós-graduação, pelo conhecimento transmitido, orientações e incentivo. Especialmente aos professores Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol e Iraê Gerrini, pelo apoio, companheirismo e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Fábio Steiner, pelo auxílio e ensinamentos na utilização do software VISUAL MINTEQ .

Ao pesquisador Dr. Adalton Fernandes pelos ensinamentos e suporte durante a utilização do software Cinética Win.

A EMBRAPA Arroz e Feijão, IAC e Agronorte pelo fornecimento de sementes dos cultivares de arroz.

Ao Prof. Dr. Maurício Dutra Zanotto pelo fornecimento de sementes das linhagens de mamona.

Ao laboratório de Bromatologia da FMVZ Unesp - Botucatu, pelo auxílio na realização de análises.

À prof. Dra Giuseppina Pace Pereira Lima por ceder laboratório do Departamento de Química e Bioquímica para realizações de análises fenólicas. E ao Dr Sérgio Marques pelo auxílio na realização das análises.

Ao prof. Dr Edivaldo Domingues Velini e Thiago Gianeti por ceder laboratório do NUPAN para realização de análises de ácidos orgânicos.

À profª Dr Tatiane Maria Rodrigues, Ricardo Tozin e Cleber pelo auxílio na realização das análises de corte anatômico de raízes.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS .....	XIV
1. RESUMO .....	01
2. SUMMARY .....	03
3. INTRODUÇÃO .....	05
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	07
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1. Experimento 1: fontes e doses de alumínio para utilização em experimentos com arroz de terras altas em solução nutritiva .....	17
5.1.1. Delineamento experimental.....	17
5.1.2. Instalação e condução do experimento.....	18
5.1.3. Avaliações.....	19
5.1.4. Análise estatística.....	21
5.2. Experimento 2: avaliação de cultivares de arroz de terras altas quanto a tolerância ao alumínio .....	21
5.2.1. Delineamento experimental.....	21
5.2.2. Descrição dos cultivares .....	22
5.2.3. Instalação e condução do experimento.....	24
5.2.4. Avaliações.....	24
5.2.5. Análise estatística.....	26
5.3. Experimento 3: avaliação de linhagens de mamona quanto a tolerância ao alumínio .....	26
5.3.1. Delineamento experimental.....	26
5.3.2. Instalação e condução do experimento.....	27
5.3.3. Avaliações.....	28
5.3.4. Análise estatística.....	28
5.4. Experimento 4: interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de silício) .....	28
5.4.1. Delineamento experimental.....	28
5.4.2. Instalação e condução do experimento.....	29
5.4.3. Avaliações.....	29



5.4.4. Análise estatística .....	33
5.5. Experimento 5: interação silício e alumínio em plantas de mamona (cultura não acumuladora de silício) .....	33
5.5.1. Delineamento experimental .....	33
5.5.2. Instalação e condução do experimento .....	34
5.5.3. Avaliações .....	34
5.5.4. Análise estatística .....	36
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
6.1. Experimento 1: fontes e doses de alumínio para utilização em experimentos com arroz de terras altas em solução nutritiva .....	37
6.1.1. Considerações finais .....	53
6.2. Experimento 2: avaliação de cultivares de arroz de terras altas quanto a tolerância ao alumínio .....	54
6.2.1. Considerações finais .....	64
6.3. Experimento 3: avaliação de linhagens de mamona quanto a tolerância ao alumínio .....	65
6.3.1. Considerações finais .....	73
6.4. Experimento 4: interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de silício) .....	73
6.4.1. Considerações finais .....	96
6.5. Experimento 5: interação silício e alumínio em plantas de mamona (cultura não acumuladora de silício) .....	98
6.5.1. Considerações finais .....	116
7. CONCLUSÕES .....	118
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
1 Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de arroz ao alumínio .....	18
2 Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de mamona ao alumínio .....	27
3 Concentrações, atividade e disponibilidade de alumínio em solução nutritiva utilizando sulfato de alumínio e potássio ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0 .....	37
4 Concentrações, atividade e disponibilidade de alumínio em solução nutritiva utilizando cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0 .....	38
5 Formas de alumínio na solução nutritiva em diferentes concentrações, utilizando sulfato de alumínio e potássio ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0 .....	38
6 Formas de alumínio na solução nutritiva em diferentes concentrações, utilizando cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0 .....	39
7 Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, massa seca da parte aérea, raiz e total de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ) .....	39
8 Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro radicular médio de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ) .....	40
9 Média do comprimento radicular dentro de três classes de diâmetro de raízes de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ) .....	40
10 Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na parte aérea de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ) .....	41

11	Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na parte de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ).....	41
12	Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na raiz de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ) .....	42
13	Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na raiz de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio - $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ e cloreto de alumínio - $\text{AlCl}_3$ ).....	43
14	Média de altura de plantas e número de perfilhos por planta de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	56
15	Média de altura de massa seca da parte aérea e radicular de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	57
16	Média de comprimento radicular e área de superfície de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	57
17	Média de comprimento radicular e área de superfície de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	58
18	Média de volume e diâmetro radicular de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	59
19	Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	60
20	Média do teor e acúmulo de alumínio na raiz de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio .....	61
21	Média de panículas por vaso, produção de grãos, massa seca da parte aérea e índice de colheita de cultivares de arroz de terras altas cultivados em solo alumínico.....	63
22	Média de altura de plantas e diâmetro do caule de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	67
23	Média de produção de massa seca da parte aérea e radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	67
24	Média de produção de massa seca total e relação raiz/parte aérea de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	68

25	Média de comprimento e área de superfície radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	69
26	Média de volume e diâmetro radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	70
27	Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	71
28	Média do teor e acúmulo de alumínio na raiz de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio .....	72
29	Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, produção de massa seca da parte aérea, raiz e total de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio.....	73
30	Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	74
31	Média de diâmetro, espessura de cortex, espessura por xilema e número de elemento de vaso em raízes (microscopia eletrônica) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio.....	76
32	Média de comprimento radicular dentro de classes de diâmetro (finas, médias e grossas) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	76
33	Média de relação raiz - parte aérea e eficiência de utilização de silício de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	82
34	Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	83
35	Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao $Al^{3+}$ e ANa 7007 – tolerante ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	84

- 36 Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 84
- 37 Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 85
- 38 Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 85
- 39 Média de eficiência de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 88
- 40 Média dos parâmetros cinéticos ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ) da absorção de silício e alumínio de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 89
- 41 Média do teor de compostos fenólicos solúveis e acúmulo de lignina na parte aérea e raiz de de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 93
- 42 Média do teor de celulose e FDA na parte aérea e raiz de linhagens de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 95
- 43 Média do teor ácidos orgânicos identificados na solução nutritiva antes da colheita de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 96
- 44 Média de altura de plantas, diâmetro de caule, número de folhas por planta, produção de massa seca da parte aérea, raiz e total de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 98
- 45 Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 99

46	Desdobramento de comprimento e área de superfície radicular de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	99
47	Média de comprimento radicular dentro de classes de diâmetro (finas, médias e grossas) de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	100
48	Média de diâmetro, espessura de cortex, espessura por xilema e número de elemento de vaso em raízes (microscopia eletrônica) de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	102
49	Média de relação raiz/parte aérea e eficiência de utilização de silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	106
50	Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	106
51	Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	107
52	Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	107
53	Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	108
54	Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	109
55	Média de eficiência de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	110
56	Média dos parâmetros cinéticos ( $V_{max}$ , $K_m$ e $C_{min}$ ) da absorção de silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio .....	111

- 57 Média do teor de compostos fenólicos solúveis e acúmulo de lignina na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 114
- 58 Média do teor de celulose e FDA na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 114
- 59 Média de do teor ácidos orgânicos identificados na solução nutritiva antes da colheita cultivadas com linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 115

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1 Produção de massa seca da parte aérea (A), raiz (B) e total (C), altura de plantas (D) e número de perfilhos por planta (E) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	44
2 Comprimento (A), área de superfície (B), volume (C) e diâmetro médio de raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	45
3 Comprimento de raízes finas (A), comprimento de raízes médias (B) e comprimento de raízes grossas (C) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	46
4 Teor de nitrogênio na raiz (A) e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (B) e raiz (C) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	46
5 Teor de fósforo na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de fósforo na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	47
6 Teor de potássio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de potássio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( X ). * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$ .....	48
7 Teor de cálcio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cálcio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( X ). * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$ .....	49
8 Teor de magnésio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de magnésio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). ** $p < 0,01$ .....	49
9 Teor de enxofre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de enxofre na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ) e cloreto de alumínio ( $\square$ ). ** $p < 0,01$ .....	50



- 10 Teor de boro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de boro na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$  ..... 51
- 11 Teor de cobre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cobre na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$  ..... 51
- 12 Teor de ferro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de ferro na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$  ..... 52
- 13 Teor de manganês na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de manganês na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$  ..... 53
- 14 Teor de zinco na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de zinco na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$  ..... 53
- 15 Distribuição dos cultivares em quartis delimitados pelo comprimento radicular em  $0 \mu\text{mol L}^{-1}$  de alumínio e pelo índice de susceptibilidade do crescimento radicular à toxicidade do alumínio, nos pontos determinados pela média de comprimento radicular (sem  $\text{Al}^{3+}$ ) + 75% do seu desvio padrão e pela média de índice de susceptibilidade radicular ao alumínio - 25% do seu desvio padrão. Legenda de cultivares: 1-BRS Monarca, 2-BRS Pepita, 3-BRS Bonança, 4-BRS Primavera, 5-BRS Sertaneja, 6-Maravilha; 7-IAC 202; 8-AN Cambará e 9-ANa 7007 ..... 55
- 16 Distribuição dos cultivares em quartis delimitados pelo comprimento radicular em  $0 \mu\text{mol L}^{-1}$  de alumínio e pelo índice de susceptibilidade do crescimento radicular à toxicidade do alumínio, nos pontos determinados pela média de comprimento radicular (sem  $\text{Al}^{3+}$ ) + 75% do seu desvio padrão e pela média de índice de susceptibilidade radicular ao alumínio - 25% do seu desvio padrão. Legenda de linhagens: 1-CRZ H06, 2-CRZ H11, 3-CRZ H12, 4-CRZ H15, 5-CRZ H17, 6-CRZ H18, 7-CRZ H19, 8-CRZ H22 e 9-FCA ..... 66
- 17 Ilustração da diferença de comprimento radicular nas classes de diâmetros, finas (x), médias ( $\square$ ) e grossas ( $\Delta$ ) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 76

- 18 Secções transversais de raízes de arroz submetidas a diferentes tratamentos. Cultivar tolerante ao alumínio (A-C). 0 Si e  $Al^{3+}$  (A). 1,4  $Al^{3+}$  (B). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (C); Cultivar suscetível ao alumínio (D-F). 0 Si e  $Al^{3+}$  (D). 1,4  $Al^{3+}$  (E). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (I-J). En: endorme; Ep: epiderme; Ex: exoderme; setas indicam células da exoderme colapsadas; asteriscos indicam células da epiderme e da exoderme colapsadas. Barras: 50  $\mu m$  ..... 78
- 19 Secções longitudinais da raiz de arroz do cultivar tolerante ao alumínio. 0 Si e  $Al^{3+}$  (I). 1,4  $Al^{3+}$  (J). Barras: 50  $\mu m$  ..... 78
- 20 Morfologia externa da raiz de arroz cultivada em solução nutritiva e tratada com hematoxilina férrica. Cultivar tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $Al^{3+}$  (A). 1,7 Si (B). 1,4  $Al^{3+}$  (C). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (D); Cultivar suscetível ao alumínio (E-H). 0 Si e  $Al^{3+}$  (E). 1,7 Si (F). 1,4  $Al^{3+}$  (G). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (H). Barras: 0,12 mm..... 81
- 21 Taxas de influxo líquido de silício (A) e alumínio (B), estimadas de acordo com concentração de silício e alumínio na solução nutritiva sob cultivo de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos) ..... 90
- 22 Ilustração da diferença dos comprimento radicular nas classes de diâmetros, finas (x), médias ( $\square$ ) e grossas ( $\Delta$ ) de linhagens de mamonas (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio ..... 101
- 23 Secções transversais da raiz de mamona em estrutura primária. Linhagem tolerante ao alumínio (A); Linhagem suscetível ao alumínio (B) . Barras: 100  $\mu m$  ..... 103
- 24 Secções transversais (A-F) e longitudinais (G-J) de raízes de mamona a combinações de silício e alumínio. Linhagem tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $Al^{3+}$  (A). 1,1  $Al^{3+}$  (B). 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  (C). Cilindro vascular no tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  (D). Linhagem suscetível ao alumínio (E-F). 0 Si e  $Al^{3+}$  (E). 1,1  $Al^{3+}$  (F). Linhagem tolerante ao alumínio (G-H). 0 Si e  $Al^{3+}$  (G). 1,1  $Al^{3+}$  (H). Linhagem suscetível ao alumínio (I-J). 0 Si e  $Al^{3+}$  (I). 1,1  $Al^{3+}$  (J). Co: córtex; Ep: epiderme; \*: células colapsadas no córtex; ponta de seta indica região colapsada da epiderme; seta indica região abaulada do ápice radicular. Barras: A-F = 100  $\mu m$ , G-J 150  $\mu m$  ..... 103
- 25 Morfologia externa da raiz de mamona cultivada em solução nutritiva e tratada com hematoxilina férrica. Linhagem tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $Al^{3+}$  (A). 1,7 Si (B). 1,1  $Al^{3+}$  (C). 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  (D); Linhagem suscetível ao alumínio (E-H). 0 Si e  $Al^{3+}$  (E). 1,7 Si (F). 1,1  $Al^{3+}$  (G). 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  (H). Barras: 0,5 mm ..... 105

- 26 Taxas de influxo líquido de silício, estimadas de acordo com concentração de silício na solução nutritiva sob cultivo de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos) ..... 112
- 27 Curvas de esgotamento de alumínio na solução nutritiva em 48 horas sob cultivo de linhagens de mamona, CRZ 6 tolerante (A) e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$  (B) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos)..... 112

## 1. RESUMO

A toxicidade ao alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) é um dos principais limitantes da produtividade em solos ácidos e o silício (Si) é uma forma interessante de se minimizar a toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas, porém, ainda não se conhece de forma clara o mecanismo envolvido na interação Si e  $\text{Al}^{3+}$ . Assim, os objetivos que fundamentaram esse trabalho foram: avaliar a capacidade de fontes e doses de  $\text{Al}^{3+}$  em causar toxidez em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva; avaliar a suscetibilidade ao  $\text{Al}^{3+}$  de cultivares de arroz de terras altas utilizados atualmente por agricultores brasileiros; avaliar a suscetibilidade ao  $\text{Al}^{3+}$  de linhagens de mamona do programa de melhoramento genético da FCA - UNESP; avaliar a interação Si e  $\text{Al}^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de Si) e mamona (cultura não acumuladora de Si). Foram instalados cinco experimentos em casa de vegetação, conduzidos em solução nutritiva. Todos utilizaram delineamento em blocos casualizados e quatro repetições. Experimento 1 - disposto em modelo fatorial  $2 \times 5$ , os tratamentos foram duas fontes de  $\text{Al}^{3+}$  (sulfato de alumínio e potássio e cloreto de alumínio) e cinco doses de  $\text{Al}^{3+}$  (0; 370; 740; 1100 e 1480  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) avaliadas em plantas de arroz de terras altas. Experimento 2 - disposto em modelo fatorial  $2 \times 9$ , os tratamentos foram com e sem  $\text{Al}^{3+}$  e nove cultivares de arroz de terras altas. Experimento 3 - disposto em modelo fatorial  $2 \times 9$ , os tratamentos foram com e sem  $\text{Al}^{3+}$  e nove linhagens de mamona. Experimento 4 - disposto em modelo fatorial  $2 \times 4$ , os tratamentos foram dois cultivares de arroz de terras altas (ANa 7007 - tolerante e Maravilha - suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ ) e quatro combinações de Si e  $\text{Al}^{3+}$  (1 - sem Si e sem  $\text{Al}^{3+}$ ; 2 - com Si e sem  $\text{Al}^{3+}$ ; 3 - sem Si e com  $\text{Al}^{3+}$ ; 4 - com Si e com  $\text{Al}^{3+}$ ). Experimento 5 - disposto em modelo fatorial  $2 \times 4$ , os tratamentos foram duas linhagens de mamona (CRZ H06 - tolerante e CRZ H18 - suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ ) e quatro combinações de Si e  $\text{Al}^{3+}$  (1 -

sem Si e sem  $Al^{3+}$ ; 2 – com Si e sem  $Al^{3+}$ ; 3 – sem Si e com  $Al^{3+}$ ; 4 – com Si e com  $Al^{3+}$ ). O cloreto de alumínio e a concentração de  $1480 \mu mol L^{-1}$  de  $Al^{3+}$  são mais eficazes em causar toxidez por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva. Os cultivares de arroz de terras altas BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja, IAC 202, AN Cambará e ANa 7007 foram considerados tolerantes ao  $Al^{3+}$ ; e, os cultivares BRS Monarca e Maravilha suscetíveis. As linhagens de mamona CRZ H06, H11 e H17 foram consideradas tolerantes ao  $Al^{3+}$ ; e, as linhagens CRZ H12, H15, H18, H19, H22 e FCA suscetíveis. O Si ameniza a toxidez causada por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas e mamona.

**Palavras-chave:** *Oryza sativa*, *Ricinus communis*, cinética de absorção, ácidos orgânicos, compostos fenólicos, lignina.

INTERACTION SILICON AND ALUMINUM IN UPLAND RICE AND CASTOR OIL PLANTS. Botucatu, 2015. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LUCAS BARBOSA DE FREITAS

Adviser: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

## 2. SUMMARY

The aluminum toxicity is a major limiting productivity in acid soils and Si is an interesting way to minimize the  $Al^{3+}$  toxicity in plants, however, the mechanism of this interaction between Si and  $Al^{3+}$  is not well understood. The objectives underlying this work were: evaluate the efficiency of aluminum sources and doses in causing toxicity in upland rice plants grown in nutrient solution; describe the susceptibility to  $Al^{3+}$  by upland rice cultivars currently used by Brazilians farmers; describe the susceptibility of castor bean cultivars of FCA - UNESP' plant breeding program; evaluate the interaction between Si and  $Al^{3+}$  in upland rice plants (Si-accumulator plant) and castor bean (non-Si-accumulator plant). Were installed five greenhouse experiments, conducted in nutrient solution. All experiments were laid out in randomized block design, with four replications. Experiment 1 - arranged in factorial design 2x4, the treatments were two  $Al^{3+}$  source (aluminum sulfate and aluminum chloride) and five  $Al^{3+}$  doses (0; 370; 740; 1100 and 1480  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) evaluated in upland rice plants. Experiment 2 - arranged in factorial design 2x9, the treatments were with and without  $Al^{3+}$  and nine upland rice cultivars. Experiment 3 - arranged in factorial design 2x9, the treatments were with and without  $Al^{3+}$  and nine castor bean cultivars. Experiment 4 - arranged in factorial design 2x4, the treatments were two upland rice cultivars (Maravilha  $Al^{3+}$  susceptible and ANa 7007  $Al^{3+}$  tolerant) and four Si e  $Al^{3+}$  combinations (1-without Si and without  $Al^{3+}$ ; 2-with Si and without  $Al^{3+}$ ; 3- without Si and with  $Al^{3+}$ , 4-with Si and with  $Al^{3+}$ ). Experiment 5 - arranged in factorial design 2x4, the treatments were two castor bean cultivars (CRZ H18  $Al^{3+}$  susceptible and CRZ H06  $Al^{3+}$  tolerant) and four Si e  $Al^{3+}$  combinations (1-without Si and without  $Al^{3+}$ ; 2-with Si and without  $Al^{3+}$ ; 3- without Si and with  $Al^{3+}$ , 4-with Si and with  $Al^{3+}$ ). Aluminum chloride and  $Al^{3+}$  concentration of 1480  $\mu\text{mol L}^{-1}$  are more effective in cause  $Al^{3+}$  toxicity in upland rice plants grown in nutrient solution. The upland rice

cultivars BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja, IAC 202, AN Cambará and ANa 7007 were considered  $Al^{3+}$  tolerant; and, the cultivars BRS Monarca and Maravilha  $Al^{3+}$  susceptible. The castor bean lines CRZ H06, H11 and H17 were considered  $Al^{3+}$  tolerant; and, the lines CRZ H12, H15, H18, H19, H22 e FCA  $Al^{3+}$  susceptible. The Si alleviates the  $Al^{3+}$  toxicity in upland rice and castor bean plants.

**Keywords:** *Oryza sativa*, *Ricinus communis*, absorption kinetics, organics acids, phenolics compounds, lignin.

### 3. INTRODUÇÃO

A toxidez causada por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) em plantas tem seu efeito primário nas raízes, inibindo seu crescimento. Estas se tornam atrofiadas, quebradiças, com poucas ramificações finas, parede celular rígida e espessa, e com alterações nas proteínas de transporte da membrana. Além disso, o  $\text{Al}^{3+}$  também pode alterar de forma negativa atividades fisiológicas no interior da planta. Conseqüentemente, as raízes se tornam pouco eficientes na absorção de água e nutrientes.

Apesar de o arroz de terras altas ser historicamente considerado planta tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ , esta pode sim ter seu crescimento impedido ou diminuído no cultivo em solos com altos teores de  $\text{Al}^{3+}$ , o que pode limitar o crescimento das raízes nos primeiros centímetros do solo, na maioria das vezes a menos de 10 cm de profundidade.

Plantas de mamona são consideradas resistentes ao estresse hídrico, o que pode gerar confusão, levando a acreditar que essas plantas são rústicas e assim, pouco exigentes em nutrientes, tolerantes a acidez e  $\text{Al}^{3+}$  do solo. Pelo contrário, plantas de mamona são exigentes nutricionalmente e sensíveis ao  $\text{Al}^{3+}$ , tolerando no máximo 10% de saturação por  $\text{Al}^{3+}$  (LIMA et al., 2007).

Assim, deve-se buscar amenizar a toxidez causada por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas, visando obter máxima eficiência produtiva. A utilização de Si pode ser interessante tendo em vista o objetivo de diminuir a toxidez causada por  $\text{Al}^{3+}$ . Este, que é considerado elemento benéfico, com seu efeito mais evidente em cultivo sob condições de estresse.

O Si é capaz de proteger as plantas contra estresses bióticos e abióticos, incluindo estresse causado por  $\text{Al}^{3+}$ . Porém, a interação Si e  $\text{Al}^{3+}$  é pouco conhecida, havendo diversas hipóteses para a amenização do  $\text{Al}^{3+}$  pelo Si, mas nenhuma



conclusiva. Ainda, não se é bem estabelecido se existe alguma relação entre plantas acumuladoras e não acumuladoras de Si na interação Si e  $Al^{3+}$ .

Portanto, os objetivos que fundamentaram esse trabalho foram: 1- avaliar a capacidade de fontes e doses de  $Al^{3+}$  em causar toxidez em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva; 2 - avaliar a suscetibilidade ao  $Al^{3+}$  por cultivares de arroz de terras altas utilizados atualmente por agricultores brasileiros; 3 - avaliar a suscetibilidade ao  $Al^{3+}$  por linhagens de mamona do programa de melhoramento genético da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP; 4 - avaliar a interação Si e  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de Si) e mamona (cultura não acumuladora de Si).

Ainda, a fim de alcançar o objetivo geral proposto no objetivo 4, alguns objetivos específicos foram traçados para este trabalho, como: 4.1 - avaliar o crescimento e produção de massa seca das plantas; 4.2 - avaliar a nutrição mineral das plantas; 4.3 - determinar a cinética de absorção de Si e  $Al^{3+}$  ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ); 4.4 - identificar e quantificar de ácidos orgânicos de baixo peso molecular exsudados por plantas de arroz e mamona; 4.5 - determinar parâmetros bioquímicos das plantas de arroz e mamona (lignina, celulose e compostos fenólicos); 4.6 - estudar a morfologia radicular interna e externa de plantas de mamona e arroz sob toxidez por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A toxidez causada por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) é um dos principais limitantes da produção agrícola em solos ácidos, os quais representam 40 % da superfície terrestre e 50% de toda área potencialmente arável do mundo (KOCHIAN et al., 2004). No Brasil 60 % dos solos são ácidos e tem concentração de  $\text{Al}^{3+}$  em níveis tóxicos ao crescimento radicular. Em geral, o pH da maioria dos solos brasileiros varia entre 3,7 e 5,5, e o  $\text{Al}^{3+}$  é o cátion predominante em mais de um terço dos solos com pH inferior a 5,6 (ABREU JR. et al., 2003).

A espécie química do  $\text{Al}^{3+}$  no solo pode variar de acordo com o pH deste (BERTSCH; PARKER, 1995). Em pH ácido, menor que 5,0 o alumínio trivalente existe como hexahidrato octaedral ( $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ) que por convenção é chamado de  $\text{Al}^{3+}$  (WRIGHT, 1989). Na referida faixa de pH, cerca de 90% do alumínio está na forma  $\text{Al}^{3+}$ , forma esta tóxica ao crescimento vegetal.

Ainda, dependendo do pH do solo, o alumínio pode se apresentar ligado a outros íons ou substâncias, estas que são relativamente insolúveis e não são absorvidas pelas plantas ou causam toxidez. Cita-se o sulfato ( $\text{AlSO}_4^+$ ), fluoreto ( $\text{AlF}^{2+}$ ), fosfato ( $\text{AlH}_2\text{PO}_4^{2+}$ ), ligantes orgânicos (Al-orgânico), polímeros (polinúcleos de Al) e hidróxidos ( $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3^0$  e  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ) (DELHAIZE; RYAN, 1995; BLOOM; ERICH, 1996).

O  $\text{Al}^{3+}$  é mais fortemente atraído para as proximidades das partículas com cargas negativas do solo em detrimento ao potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Isso ocorre porque o  $\text{Al}^{3+}$  tem três valências, enquanto  $\text{K}^+$  uma e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  duas valências. Dessa forma, o  $\text{Al}^{3+}$  permanece ligado aos colóides do solo, enquanto os cátions (macronutrientes) tendem a serem perdidos por lixiviação, por esse motivo os

solos tropicais tem alta concentração de  $\text{Al}^{3+}$  e baixa de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  (BOHNEN, 2000). Freitas et al. (2006) observaram significativa redução da absorção dos macronutrientes P, Mg, Ca e K em genótipos de arroz quando sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$ .

Portanto, além da própria toxidez causada pelo íon  $\text{Al}^{3+}$  em plantas, este, interfere negativamente na fertilidade do solo, devido a interação de alguns fatores, como aumento da concentração de  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  e decréscimo das concentrações dos cátions  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  e, solubilidade de P e Mo.

Não se conhece com exatidão as bases bioquímicas da fitotoxidez de alumínio em plantas, no entanto, sabe-se que o principal dano da toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas é a inibição do crescimento radicular (KOCHIAN, 2004). Na célula pode ocorrer danos na parede celular, membrana plasmática, citoesqueleto e núcleo celular. No entanto, ocorre no apoplasto a maior associação do  $\text{Al}^{3+}$  com a raiz (SILVA et al., 2000; TAYLOR et al., 2000).

A divisão celular da raiz pode ser interrompida ou diminuída na presença de  $\text{Al}^{3+}$ , isso ocorre devido ao aumento da estabilidade da dupla hélice, dificultando, portanto, a replicação de DNA na interfase (MORIMURA; MATSUMOTO, 1978). O  $\text{Al}^{3+}$  pode também interferir no alongamento celular por reduzir a plasticidade e a elasticidade da parede celular (KLIMASHEVSKII; DEDOV, 1976). Talvez por esse motivo, o sítio de ação primária do  $\text{Al}^{3+}$  seja no ápice das raízes, mais especificamente na parte distal da zona de transição, onde as células estão entrando em fase de alongamento (SIVAGURU; HORST, 1998).

Há influência do  $\text{Al}^{3+}$  na mudança da homeostase celular do  $\text{Ca}^{2+}$  e da competição por canais de  $\text{Ca}^{2+}$ . A inibição da absorção celular de  $\text{Ca}^{2+}$  pelo  $\text{Al}^{3+}$  afeta vários processos celulares, tais como, mitose, citocinese, crescimento polar, correntes citoplasmáticas e sinalização celular (HUANG et al., 1996; ZHANG; RENGEL, 1999) e pode interagir e inibir a enzima fosfolipase C associada às vias de transporte do Ca (JONES; KOCHIAN, 1995). Ainda, o  $\text{Al}^{3+}$  fixa P em formas não disponíveis nas superfícies das raízes, diminuindo a respiração desta (FLEMING et al., 1974; NICHOL; OLIVEIRA, 1995).

O  $\text{Al}^{3+}$  também pode provocar alterações na permeabilidade da membrana plasmática, influenciando na passagem de íons tanto para o interior da planta quanto para seu exterior (KOCHIAN, 1995; AHN et al., 2001; YAMAMOTO et al., 2001). Isso ocorre por que o  $\text{Al}^{3+}$  forma ligações com compostos de oxigênio, este pode interagir

com sítios no apoplasto e simplasto nas raízes. Dessa forma, a interação com essas substâncias é importante fator de toxidez (MA et al., 2001).

A fisiologia da planta também pode ser alterada pelo  $Al^{3+}$ , como enzimas (SLASKI, 1990; COPELAND; DELIMA, 1992), respiração (KLIMASHEVSKII et al., 1972), fosforilação dos açúcares (CLARKSON, 1965), atividade de ATPases (KLIMASHEVSKII et al., 1972), fosfatases ácidas (CLARK; BROWN, 1974), teor de aminoácidos (KLIMASHEVSKII et al., 1970) e fotossíntese (LEMOS FILHO, 1982).

Dessa forma, devido aos fatores acima citados, as raízes das plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  se tornam atrofiadas, quebradiças, com poucas ramificações finas, aumenta a rigidez e espessura da parede celular, altera as proteínas de transporte na membrana (MEHARG, 1993; KOCHIAN et al., 2004; VITORELLO et al., 2005). Conseqüentemente, as raízes se tornam pouco eficientes na absorção de água e nutrientes, especialmente da subsuperfície (FOY, 1976; KOCHIAN, 1995; BRONDANI; PAIVA, 1996; MISTRO et al., 2001; MENDONÇA et al., 2003; WANG et al., 2006).

O  $Al^{3+}$  normalmente acumula-se preferencialmente no sistema radicular das plantas, com pequena quantidade translocada para a parte aérea (BEUTLER et al., 2001). Apesar de não haver exatamente um efeito do  $Al^{3+}$  na parte aérea, o efeito no crescimento desta é apresentado como consequência dos danos causados por  $Al^{3+}$  no sistema radicular, especialmente relacionada a redução na absorção de água e nutrientes (MATSUMOTO et al., 1976). Isso ocorre, porque o  $Al^{3+}$  pode induzir a deposição de calose nos canais plasmodesmáticos, inibindo fisicamente o transporte simplástico entre células (SIVAGURU et al., 2000).

Os sintomas de toxicidade ao  $Al^{3+}$  não são facilmente identificáveis, no entanto, existem algumas descrições, as quais definem que os sintomas ocorrido nas folhas, se assemelham a deficiência de P, retardando o crescimento da planta como um todo, o que pode levar a ocorrência de folhas pequenas, escuras e com maturidade precoce, além do encurtamento dos talos. Ainda, elevadas concentrações de  $Al^{3+}$  também podem induzir a deficiência e sintomas de deficiência de Fe em arroz, sorgo e trigo (CLARK et al., 1981; FURLANI; CLARK, 1981).

Diante do exposto, a experimentação agrícola em solução nutritiva avaliando os efeitos danosos do  $Al^{3+}$  em plantas cultivadas se torna uma ferramenta válida no intuito de avaliar os danos causados por este íon tóxico as plantas de forma mais rápida. No entanto, não é bem definida a fonte de  $Al^{3+}$  para utilização em solução nutritiva.

Uma vez que Furlani e Furlani (1988) citavam o sulfato de alumínio e potássio ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) como fonte para gerar toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  sob plantas de arroz de terras altas em experimento em solução nutritiva. Por outro lado, trabalhos recentes utilizam o cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (ZONTA, 2003; MAURI et al., 2004; GUIMARÃES et al., 2006).

Dessa forma, se faz necessário a definição da forma de  $\text{Al}^{3+}$  mais eficaz em gerar toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas, especialmente em arroz de terras altas, visando maior confiabilidade dos resultados gerados.

De forma geral, apesar de o arroz de terras altas ser historicamente considerado uma planta tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$  (FAGERIA et al., 1988; MA et al., 2002; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006), esta pode sim ter seu crescimento impedido ou diminuído em cultivo sob solos com  $\text{Al}^{3+}$  (CAMARGO; CAMARGO, 1984; FERREIRA et al., 1995; MENDONÇA et al., 2003; FREITAS et al., 2006), limitando o crescimento radicular a camadas superficiais do solo, na maioria das vezes a menos de 10 cm, onde se concentra a matéria orgânica (KOCHIAN, 1995).

Dessa forma, há redução do volume de solo explorado pelas raízes, impossibilitando que as plantas desenvolvam todo seu potencial produtivo, impedindo que a planta tenha acesso à água em camadas mais profundas do solo, tornando-a mais suscetíveis ao estresse hídrico, e também limitando ainda mais a absorção de nutrientes.

Cultivares modernos de arroz de terras altas são menos tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$  em comparação a cultivares tradicionais (JUSTINO et al., 2006), talvez, isso se deve ao processo de melhoramento genético dos cultivares, onde vem perdendo essa característica. Nesse sentido, não existem relatos no Brasil de descrição detalhada dos cultivares modernos utilizados por agricultores quanto sua suscetibilidade ao  $\text{Al}^{3+}$ . Há apenas descrições visuais a campo para cultivares já lançados e Guimarães et al. (2006), descreveram suscetibilidade de linhagens de arroz ao  $\text{Al}^{3+}$ , estas pertencentes ao banco de germoplasma da EMBRAPA. Além de avaliações específicas e restritas a baixo número de cultivares como realizadas por Mendonça et al. (2003) e Justino et al. (2006). Portanto há a necessidade de se descrever os cultivares modernos de arroz de terras altas quanto sua suscetibilidade ao  $\text{Al}^{3+}$ , principalmente os cultivares que são utilizados em grande escala por agricultores brasileiros.

Ao contrário do cultivo do arroz de terras altas, o ideal para o cultivo da mamona é em solo com pH próximo da neutralidade, ou seja, entre 6,0 e 6,5, e

saturação de bases superior a 60%, dessa forma, o  $Al^{3+}$  presente no solo praticamente estará precipitado em formas não tóxicas, não causando problemas ao crescimento das plantas de mamona. Ainda, o pH na faixa de 5,5 a 8,0 é tolerado pelas plantas, sem prejuízo drástico à produção. Mas quando o pH for inferior a 5,5, deve-se fazer a correção da acidez do solo para evitar redução da produtividade.

Apesar de plantas de mamona serem resistente a estresse hídrico (BELTRÃO et al., 2003), esta é exigente nutricionalmente (SEVERINO et al., 2005; 2006) e suscetível à presença de  $Al^{3+}$  no solo, tolerando no máximo 10% de saturação por  $Al^{3+}$  (LIMA et al., 2007). Essas características se confundem (WEISS, 1983), levando a acreditar que plantas de mamona são rústicas e assim, pouco exigentes em nutrientes e tolerantes a solos com pH ácido (4,0 a 4,5).

Avaliando o efeito da toxidez por  $Al^{3+}$  no crescimento de plantas de mamona, Lima et al. (2007) observaram redução de massa seca radicular na faixa de 88% e massa seca da parte aérea de 84%, quando expostas ao  $Al^{3+}$  em comparação a plantas sem toxidez.

No entanto, são escassas na literatura avaliações com maiores descrições quanto ao efeito da toxidez causada por  $Al^{3+}$  em plantas de mamona, além disso, existe pouca informação quanto a descrição de linhagens e ou cultivares de mamona e sua tolerância ao  $Al^{3+}$ .

Diante dos danos causados por  $Al^{3+}$  em plantas já relatados, deve-se buscar meios de mitigar e amenizar o efeito tóxico deste íon. Destaca-se a amenização do  $Al^{3+}$  mediada pelo Si. Este que é considerado elemento benéfico (MALAVOLTA, 1980; EPSTEIN, 1999; KORNDÖRFER, 2006), apesar da legislação brasileira o considerar micronutriente (BRASIL, 2004). O Si tem seu efeito mais evidente em plantas cultivadas sob condições de estresse (MA; TAKAHASHI, 2002). Isto ocorre porque o Si é capaz de proteger as plantas contra estresses bióticos e abióticos (LUX et al., 2002; MA; YAMAJI, 2006), entre eles o estresse por  $Al^{3+}$  (GALVEZ; CLARK, 1991; HODSON; SANGSTER, 1993; HAMMOND et al., 1995; CORRALES et al., 1997; COCKER et al., 1998; SANGSTER; HODSON, 2001; KIDD et al., 2001; MA et al., 2001; WANG et al., 2004). Porém, a interação Si e  $Al^{3+}$  ainda é pouco conhecida, e há diversas hipóteses para a amenização do efeito tóxico causado pelo  $Al^{3+}$  em plantas mediado pelo Si, mas nenhuma conclusiva.

Os benefícios do Si na amenização da toxidez ao  $Al^{+3}$  são fundamentados em dois aspectos: solução do solo e mecanismos internos das plantas (COCKER et al., 1998). Ma et al. (1997) citam que o efeito do Si na amenização do  $Al^{+3}$  tóxico é resultado na diminuição da concentração do  $Al^{+3}$  na solução do solo, onde formaria complexos Al-Si. Segundo Malavolta et al. (1997), o Si provavelmente diminui a atividade dos íons  $Al^{3+}$  na solução do solo, fazendo com que ocorra melhor desenvolvimento radicular, aumentando a velocidade de difusão dos nutrientes da solução do solo e, conseqüentemente, provocando maior absorção de nutrientes pelas raízes. Este mecanismo poderia diminuir a fitotoxidez por  $Al^{3+}$  e a carência de água e nutrientes nos solos originalmente tropicais e subtropicais e, em consequência, induzir aumento de produtividade por área cultivada.

Trabalhando com a aplicação de Si em plantas de trigo cultivadas em solução nutritiva, Zsoldos et al. (2003) verificaram que o efeito tóxico do  $Al^{3+}$  para o crescimento radicular foi diminuído com a adição de Si. Isso demonstra, que o Si solúvel pode formar compostos inertes com o  $Al^{3+}$  na solução (precipitados).

Em contrapartida, outros estudos demonstraram que o Si pode amenizar a toxicidade ao  $Al^{+3}$ , não só por diminuir a atividade de  $Al^{+3}$  livre na solução do solo, mas também reduzindo toxidade no interior da planta (GALVEZ; CLARK, 1991; HODSON; SANGSTER, 1993; HODSON; EVANS, 1995; CORRALES et al., 1997; COCKER et al., 1998; MA et al., 2001; NEUMAM; NIEDEN, 2001; KIDD et al., 2001; LIANG et al., 2007). Estes resultados indicam que a interação Si e  $Al^{+3}$  ocorre especialmente no interior da planta, embora ainda assim, pode ocorrer formação de complexo Si e  $Al^{+3}$  externamente, contribuindo para a amenização da toxidez ao  $Al^{+3}$ .

Alguns relatos demonstraram que o Si pode amenizar a toxidez causada por  $Al^{3+}$  no interior de plantas por meio de estímulo dos mecanismos de produção de antioxidantes, complexação do  $Al^{3+}$  e imobilização deste por compartimentação em vacúolos, citoplasma ou na parede celular (NEUMAM; NIEDEN, 2001; LIANG et al., 2007).

O Si também pode proporcionar maior acúmulo de  $Al^{3+}$  na parede celular em raízes de plantas de milho, reduzindo sua mobilidade no apoplasto, dessa forma, auxiliando na desintoxicação do  $Al^{3+}$  no apoplasto do ápice das raízes (WANG et al., 2004).

Ainda, Cocker et al. (1998) citam que as acumulações de  $Al^{3+}$  e Si na parte aérea das plantas são mutuamente exclusivas, isto é, quando o Si é absorvido o  $Al^{3+}$  deixa de ser. Dessa forma, a tolerância de algumas espécies ao  $Al^{3+}$ , entre outros fatores, pode estar associada à maior absorção e acumulação de Si nos tecidos da planta.

Alguns trabalhos citam a importância do Si em aliviar a toxidez causada por  $Al^{3+}$  em raízes de plantas (HODSON; SANGSTER, 1999), como em trigo (COCKER et al., 1998), arroz (WANG et al., 2004; FREITAS et al., 2012), milho (MA et al., 1997; GIONGO; BOHNEN, 2011) e sorgo (HODSON; SANGSTER, 1993).

Freitas (2011), em solução nutritiva avaliou o fornecimento de Si antes do  $Al^{3+}$  para plantas de arroz de terras altas e não obteve resultado positivo para interação entre os elementos. Porém, estudando o fornecimento de Si ao solo naturalmente alumínico, obteve resposta positiva para o cultivar tolerante ao  $Al^{3+}$ , aumentando a produtividade de grãos. Isto sugere que o Si influencia na amenização da toxidez por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas, no entanto, não se conhece bem os mecanismos envolvidos (FREITAS et al., 2012).

Assim, a realização de estudos avaliando a cinética de absorção de Si e  $Al^{3+}$  é importante no sentido de detalhar a interação desses elementos, na planta e solução nutritiva, mediante a velocidade máxima de absorção ( $V_{max}$ ), que indica o máximo de transporte possível de um elemento, em outras palavras, quando os transportadores nas raízes estão carregados; constante de Michaelis-Menten ( $K_m$ ), que indica a afinidade dos carregadores pelo íon a ser transportado, onde o influxo é  $\frac{1}{2}$  da  $V_{max}$  e a concentração na solução abaixo da qual não há absorção ( $C_{min}$ ), que corresponde a concentração que o influxo para de ocorrer (EDWARDS; BARBER, 1976; SACRAMENTO; ROSOLEM, 1997). Isso por que a eficiência de absorção de qualquer elemento é influenciada pelos parâmetros cinéticos citados (BARBER, 1984).

Plantas cultivadas são divididas em dois grupos quanto a sua capacidade de acumular Si em seus tecidos, sendo, plantas acumuladoras de Si e plantas não acumuladoras de Si (MA et al., 2001). Plantas de arroz de terras altas são consideradas acumuladoras de Si, enquanto plantas de mamona são consideradas não acumuladoras. Dessa forma, além do estudo da interação Si e  $Al^{3+}$  em plantas acumuladoras de Si, este é importante também em plantas não acumuladora de Si, visando verificar se o mecanismo de interação entre os elementos é semelhante em espécies diferentes.



Existe a possibilidade de que o Si exerça função bioquímica em plantas, em especial plantas acumuladoras de Si. O Si pode estar relacionado à síntese de lignina, porque, de acordo com Mengel e Kirkby (1987) o ácido silícico reage com fenóis como o ácido cafeico e ésteres, precursores da lignina na planta, resultando em complexos de Si de alta estabilidade e baixa solubilidade, denominados compostos polifenólicos, os quais apresentam funções estruturais e são depositados nas paredes de células lignificadas (RAVEN, 1983; MARSCHNER, 1995).

A lignina é uma molécula fenólica bastante complexa, que em plantas é somente menos abundante que a celulose. A lignina ainda não tem sua estrutura bem conhecida, mas, sabe-se que é um biopolímero aromático amorfo, tridimensional, formado via polimerização oxidativa. Sua presença está ligada a rigidez das células e tecidos e resistência a estresses de natureza biótica e ou abiótica (RAES et al., 2003; CABANÉ et al., 2004; TAIZ; ZEIGER, 2009). Está presente na parede celular de plantas em variadas concentrações, em madeiras duras, de 25 a 35%; madeiras macias, de 18 a 25%; e gramíneas, de 10 a 30% (LARS, 2000).

A deposição de lignina em plantas tratadas com  $Al^{3+}$  ocorre nas células correspondentes à zona de crescimento radicular, e, sugerem que esse processo pode contribuir indiretamente para a redução dos danos às membranas celulares causados pelo  $Al^{3+}$  (SASAKI et al., 1996; BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002).

Peixoto et al. (2007) constataram que as presenças de lignina, bem como a de compostos fenólicos, na raiz da planta de sorgo foram consideradas as melhores indicadoras à tolerância ao  $Al^{3+}$ , a fim de distinguir cultivares quanto à suscetibilidade a esse elemento tóxico, quando comparados a outros parâmetros como coloração radicular por hematoxilina férrica, morfologia interna e externa dos ápices radiculares. A exposição das plantas de sorgo ao  $Al^{3+}$  resultou em aumento nos teores de lignina, nos ápices radiculares, tanto no cultivar suscetível (32%) quanto no tolerante (42%).

Assim como a lignina, os compostos fenólicos solúveis totais também atuam na toxidez do  $Al^{3+}$  na planta, porém quanto maior o teor desses compostos, maior será a ação deletéria do  $Al^{3+}$  na planta (SASAKI et al., 1996), ou seja, a planta estaria sob maior estresse.

As plantas possuem mecanismos de defesa contra estresse, seja ele biótico ou abiótico. Esses mecanismos estão associados a vários compostos, dentre eles a produção de fenóis (ZULUAGA et al., 1971; BOL et al., 1990). Segundo Agrios (1997) as

células e tecidos vegetais respondem aos danos ocasionados pelo estresse mediante a uma série de reações bioquímicas, produzindo substâncias tóxicas em altas concentrações para inibição dos mesmos. Dentre essas substâncias estão incluídas a maioria dos compostos fenólicos, como os ácidos clorogênicos e cafeico, os produtos da oxidação dos compostos fenólicos e as fitoalexinas, que em sua maioria são também substâncias fenólicas. Assim, sob condições de estresse compostos fenólicos podem atuar como antioxidantes, contribuindo para redução dos danos causados pelo  $Al^{3+}$  (SAKIHAMA; YAMASAKI, 2002).

Barceló e Poschenrieder (2002) observaram que alguns compostos fenólicos podem formar complexos estáveis com o  $Al^{3+}$ , contribuindo para a sua desintoxicação nos tecidos.

Ocorrem alterações na síntese de proteínas/quelantes em ápices radiculares em plantas quando expostas ao  $Al^{3+}$ . Uma importante classe desses quelantes são os ácidos orgânicos de baixo peso molecular provenientes do ciclo dos ácidos tricarbóxicos. Tais substâncias são liberadas no apoplasto e/ou na rizosfera, impedindo que o  $Al^{3+}$  atinja seus sítios de toxidez (MA et al., 2001).

Ma et al. (2001) descreveram dois modelos para explicar a indução dessas alterações. No primeiro modelo (I) o  $Al^{3+}$  ativa um canal iônico na membrana que promove a exsudação do ácido orgânico. No modelo II de resposta, o  $Al^{3+}$  interage com a célula via proteína receptora (R) da membrana, que ativa a transcrição dos genes que codificam as proteínas envolvidas no metabolismo de ácidos orgânicos ou de seu transporte através da membrana plasmática. Esse último mecanismo é, porém especulativo, ao contrário do modelo I de resposta, os quais estudos já identificaram alguns componentes.

Ainda, existem dois mecanismos de tolerância ao  $Al^{3+}$  mediado por ácidos orgânicos em plantas, sendo eles: os que atuam no sentido de impedir a entrada do  $Al^{3+}$  pela raiz e os que permitem a planta acumular o  $Al^{3+}$  em locais específicos, sem que causem toxidez (KOCHIAN, 1995; MA; RYAN; DELHAIZE, 2001; MA; FURUKAWA, 2003).

Por outro lado, a principal hipótese cita que havendo contato da raiz com  $Al^{3+}$ , inicialmente, a fim de garantir a expansão radicular, a planta ativa os mecanismos de exclusão do simplasma, e posteriormente a complexação interna garantiria a manutenção do desenvolvimento das raízes laterais, terciárias e de menor ordem, uma

vez que no surgimento destas, há rompimento das barreiras de proteção da raiz principal (endoderme), por onde o  $Al^{3+}$  poderia ter contato maior com as células que estão em processo de divisão e/ou alongação (ZONTA, 2003). Ou seja, dois mecanismos atuando em conjunto de forma a aumentar a resistência da planta ao  $Al^{3+}$ .

Em teoria, nem todos os ácidos orgânicos apresentam potencial para a complexação com  $Al^{3+}$ . No entanto, a capacidade de complexação dos ácidos está relacionada com a posição dos grupos OH/COOH da principal cadeia carbônica da molécula. Os ácidos orgânicos são separados em grupos quanto sua eficiência de complexação e desintoxicação do  $Al^{3+}$ , os mais eficientes são o cítrico, oxálico e málico; no grupo de eficiência moderada, malônico e salicílico e, no grupo de baixa eficiência, succínico, láctico e fórmico (HUANG; VIOLANTE, 1986; MIYASAWA et al., 1992).

Há relatos em trabalhos científicos sobre a exsudação de ácidos orgânicos por raízes de plantas como agentes na amenização da toxicidade ao  $Al^{3+}$  de grande parte das plantas cultivadas (HUANG; VIOLANTE, 1986; MIYASAWA et al., 1992; MA et al., 2001; PIÑEROS et al., 2002 e MA et al., 2004).

No entanto, são escassas as informações sobre esse mecanismo em plantas de arroz de terras altas. Ainda, há outro problema, que é saber se a quantidade do ácido exsudado isoladamente é suficiente para complexar o  $Al^{3+}$  presente no meio de crescimento destas plantas, já que a exsudação desses pode ocorrer quando a planta está submetida a qualquer estresse biótico ou abiótico, e, neste caso seja de toxidez por metais, ou por estresses induzidos pela deficiência de nutrientes (RYAN et al., 2001).

Existem evidências de que há maior estímulo a exsudação de ácidos orgânicos por raízes de plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si (BARCELÓ et al., 1993; COCKER et al., 1998). A hipótese é que na presença de Si e  $Al^{3+}$  na parede celular, ocorre exsudação de malato (ou outro composto orgânico), promovendo a formação de aluminossilicato (AS) e hidroxialuminossilicatos (HAS), diminuindo assim a toxidez causada por  $Al^{3+}$ . Dessa forma, pode ser que o Si interfira na exsudação de ácidos orgânicos de plantas sob estresse por  $Al^{3+}$ , sendo assim, necessária a investigação.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Botucatu.

Foram realizados cinco experimentos em solução nutritiva, sendo eles: 1 - fontes e doses de alumínio para utilização em experimentos com arroz de terras altas em solução nutritiva (pré-teste); 2 - avaliação de cultivares de arroz de terras altas quanto a tolerância ao alumínio; 3 - avaliação de linhagens de mamona quanto a tolerância ao alumínio; 4 - interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de silício); 5 - interação silício e alumínio em plantas de mamona (cultura não acumuladora de silício).

### **5.1. Experimento 1: fontes e doses de alumínio para utilização em experimentos com arroz de terras altas em solução nutritiva (pré-teste)**

#### **5.1.1. Delineamento experimental**

O objetivo principal do experimento foi definir de maneira definitiva a fonte mais eficiente em causar toxidez por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva, além de sua concentração mais efetiva. Além disso, buscou-se definir a fonte e dose de  $Al^{3+}$  a serem utilizadas nos experimentos 2 e 4.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial  $2 \times 5$ , com quatro repetições, utilizando solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988). Os tratamentos foram duas fontes de  $Al^{3+}$  ( $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  e  $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ ) e cinco doses de  $Al^{3+}$  em solução (0; 370; 740; 1100 e 1480  $\mu mol L^{-1}$ ). Foi utilizado o cultivar Maravilha, reconhecidamente suscetível ao  $Al^{3+}$ .

### 5.1.2. Instalação e condução do experimento

Antes da instalação do experimento, foi realizado teste preliminar das soluções estoques que seriam utilizadas, visando verificar se havia formação de precipitados na solução nutritiva ou algum outro impedimento. O teste preliminar foi instalado em 31 de janeiro de 2012, com o transplante das plântulas para solução ½ força iônica. Aos sete dias após o transplante (DAT) a solução foi substituída por força total, e 14 DAT adicionou-se  $\text{Al}^{3+}$  na solução nutritiva. Aos 21 DAT o teste preliminar foi finalizado, observando que não havia precipitados nas soluções, sendo assim aptas utilização.

Utilizou-se solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988) para fonte  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  e descrita por Furlani e Furlani (1988) modificada por Zonta (2003) para  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Tabela 1\*).

**Tabela 1.** Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de arroz ao alumínio

Solução estoque		Sol.estoque L <sup>-1</sup> da Sol.Nutritiva	Solução nutritiva básica	
Componentes	Concentração g L <sup>-1</sup>	Arroz ml L <sup>-1</sup>	Nutrientes	Concentração mg L <sup>-1</sup>
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	270,0	1,2	Ca	57,3
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	33,8		K	33,6
KCl	18,6	0,9	Mg	8,1
$\text{K}_2\text{SO}_4$	44,0		N- $\text{NO}_3^-$	59,7
$\text{KNO}_3$	24,6		N- $\text{NH}_4^+$	7,4
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	142,6	0,6	P	0,4
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	17,6	0,1	S	6,9
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	24,1	0,3	Cl	7,6
NaEDTA	25,1		Fe	1,3
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2,34	0,3	Mn	0,16
$\text{H}_3\text{BO}_3$	2,04		B	0,09
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,88		Zn	0,05
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,20		Cu	0,02
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,26		Mo	0,03
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	52,77	13,4	Al	40,00
$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}^*$	71,53	5,0	Al	40,00

\* Adaptado por Zonta (2003) para fonte de  $\text{Al}^{3+}$   $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Concentração final de potássio 60,00 mg L<sup>-1</sup> (concentração da solução estoque: KCl - 52,8,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  - 44,0 e  $\text{KNO}_3$  - 24,6 g L<sup>-1</sup>)

O experimento foi instalado no dia 17 de abril de 2012, preparando as sementes para pré germinar de acordo com descrição de Freitas (2011). Passados sete

dias as sementes foram levadas para solução a 1/5 da força iônica visando a emergência das plântulas. Em seguida, após sete dias as plântulas foram transferidas para vasos plásticos contendo 4 L de solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988) (Tabela 1), onde foram mantidas durante sete dias à meia força iônica para adaptação das mesmas. Posteriormente, aos sete DAT a solução foi substituída por força total e adicionados os tratamentos 14 DAT. A colheita do experimento foi realizada aos 49 DAT.

#### **5.1.2.1. Manejo da solução nutritiva e experimento**

As tampas utilizadas para fixar as plantas foram confeccionadas a partir de placas de isopor perfuradas para acoplar seis plantas por vaso, presas por pedaços de espuma, possibilitando as raízes entrarem em contato com a solução nutritiva. Durante todo o período do experimento a solução nutritiva foi aerada e o pH monitorado diariamente, mantendo-o em torno de 4,0 ( $\pm 0,1$ ), utilizando-se para sua correção NaOH a 0,1 mol L<sup>-1</sup> e HCl a 0,1 mol L<sup>-1</sup>. A solução nutritiva foi renovada semanalmente adicionando os respectivos tratamentos, e as perdas por evapotranspiração foram repostas diariamente com água desmineralizada.

#### **5.1.3. Avaliações**

##### **5.1.3.1. Comprimento, área de superfície, volume, diâmetro médio radicular e comprimento em cada classe de diâmetro**

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 foi feita amostragem de aproximadamente 30% do sistema radicular, acondicionando em coletor universal, com solução de 30% de álcool + 70% de água comum. Em seguida foi levado à geladeira à temperatura de 4°C, onde foram mantidas até o momento da avaliação.

As avaliações de comprimento (m vaso<sup>-1</sup>), área de superfície (cm<sup>2</sup> vaso<sup>-1</sup>), volume (cm<sup>3</sup> vaso<sup>-1</sup>) 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, que utiliza como princípio o método proposto por Tennant (1975).

Para obtenção dos resultados por vaso, após a realização das leituras no WinRhizo, as amostras foram levadas até estufa com circulação forçada de ar, a 65°C até peso constante. Posteriormente com a massa seca dessas amostras, foram

estimado os valores de comprimento ( $\text{m vaso}^{-1}$ ), área de superfície ( $\text{cm}^2 \text{ vaso}^{-1}$ ), volume ( $\text{cm}^3 \text{ vaso}^{-1}$ ) levando em consideração a massa seca de raiz total, utilizando a seguinte equação MS total de raiz x comprimento de raiz (amostra)/MS amostra de raiz.

Foi avaliado também o comprimento dentro de cada classe de diâmetro, estes foram classificados da seguinte forma, raízes finas  $<0,5 \text{ mm}$ , raízes médias  $0,5 \text{ a } 1,00 \text{ mm}$  e raízes grossas  $>1,00 \text{ mm}$ .

#### **5.1.3.2. Altura e número de perfilhos por planta**

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

O número de perfilhos por planta foi determinado na colheita do experimento, em razão da contagem do número de perfilhos por planta.

#### **5.1.3.3. Produção de massa seca do sistema radicular, parte aérea e total; e teor e acúmulo de nutrientes**

O sistema radicular e a parte aérea das plantas após lavagem foram secos separadamente em estufa com circulação forçada de ar, a  $65^\circ\text{C}$  até peso constante. Posteriormente foi determinada a matéria seca, e as amostras de raízes e da parte aérea foram moídas e avaliadas quimicamente para determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e boro (B), segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Através dos dados de produção de massa seca e dos teores de nutrientes da raiz e da parte aérea, foi determinada a quantidade acumulada de nutrientes no sistema radicular e parte aérea, respectivamente. O cálculo foi obtido multiplicando os valores de teores pelos valores de massa seca.

#### **5.1.3.4. Estimativa de atividade e disponibilidade de alumínio em solução utilizando o software VISUAL MINTEQ 3.0.**

Com o objetivo de comparar as formulações compostas por  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  em solução nutritiva, utilizou-se o software VISUAL MINTEQ 3.0 (GUSTAFSSON, 2012).

Vale ressaltar que se computou nos cálculos realizados no software VISUAL MINTEQ as diferentes concentrações de potássio e enxofre presente na fonte  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ao passo que elevou-se as doses de  $\text{Al}^{3+}$ . Bem como a quantidade de cloro na fonte  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Foram realizadas análises da atividade do  $\text{Al}^{3+}$  e a sua disponibilidade (%) em solução nutritiva em cada fonte e dose. Ainda, foram obtidas as formas nas quais o  $\text{Al}^{3+}$  se transforma com a utilização das duas fontes mencionadas.

#### **5.1.4. Análise estatística**

Foi realizada análise de variância pelo teste F e as médias referentes as fontes de  $\text{Al}^{3+}$  foram comparadas pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade, enquanto os efeitos das doses de  $\text{Al}^{3+}$  avaliados por meio de análise de regressão, adotando como critério para escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de regressão significativos a 5% de probabilidade pelo teste t.

## **5.2. Experimento 2: avaliação de cultivares de arroz de terras altas quanto a tolerância ao alumínio**

### **5.2.1. Delineamento experimental**

O experimento teve como objetivo caracterizar os cultivares atualmente utilizados na produção de arroz de terras altas quanto sua tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  e selecionar cultivar tolerante e suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  para utilização no experimento 4. Vale ressaltar que os cultivares testados foram selecionados entre os mais cultivados em regiões que cultivam a cultura em questão. Para tanto, os integrantes do projeto entraram em contato com a Embrapa, Agronorte e IAC para obter essas informações e sementes dos referidos cultivares.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial  $2 \times 9$ , com quatro repetições. Os tratamentos foram com e sem  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) e nove cultivares de arroz de terras altas (Embrapa - BRS Monarca, BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja e Maravilha; Instituto Agronômico de Campinas (IAC) - IAC 202; Agronorte - AN Cambará e ANa 7007). Ainda, o cultivar BRS Serra Dourada estava entre os cultivares testados, no entanto, não apresentou germinação satisfatória, sendo assim, retirado do teste.



### 5.2.2. Descrição dos cultivares

- BRS Monarca (Embrapa): cultivar se destaca por sua qualidade de grãos (classe - longo fino) e plantas vigorosas de porte médio e boa resistência ao acamamento, com abundante área foliar. No entanto, é suscetível ao estresse hídrico, dessa forma, deve ser cultivado preferencialmente em regiões mais favorecidas, com maior índice pluviométrico. O cultivar pode ser utilizado em variadas condições de cultivo, já que apresenta boa capacidade de competição, assim, é interessante seu cultivo utilizando-a na rotação de culturas em “terras velhas”, renovação de pastagens, áreas de abertura e integração lavoura-pecuária. O cultivar também é recomendado para a agricultura familiar que pratica colheita manual. Seu potencial produtivo é superior a  $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ . (CASTRO et al., 2007).
- BRS Pepita: caracteriza-se pela alta produtividade, plantas vigorosas e arquitetura de planta intermediária. Seus grãos são longo-finos e tem boa qualidade. Possui perfilhamento moderado, área foliar mediana e altura de planta que normalmente se situa entre 95 e 110 cm. O cultivar se destaca por ser utilizado em diversas condições de cultivo, incluindo, rotação de culturas em “terras velhas”, áreas de desmatamento recente, renovação de pastagens degradadas e integração lavoura-pecuária. Além disso, tem demonstrado boa produtividade quando sob estresse hídrico (BRESEGHELLO et al., 2007).
- BRS Bonança: cultivar semi-precoce, de porte médio, resistente ao acamamento. Seus grãos se enquadram na classe de grãos longos, aproximando-se da classificação comercial longo fino, no entanto, apresentam problemas de adequação a uma referida classe por terem dimensões próximas do limite entre elas, entretanto apresentam boa aparência e boa qualidade culinária. Destaca-se pela excepcional estabilidade do rendimento de grãos inteiros. É um cultivar desenvolvido para cultivo em solos de média a alta fertilidade. Apresenta ampla adaptação a sistemas de manejo e tipos de solo. Possui produtividade média de  $3.061 \text{ kg ha}^{-1}$  (CASTRO et al., 2003).
- BRS Primavera: indicado para cultivo em áreas de abertura e áreas velhas, pouco ou moderadamente férteis, devido sua tendência ao acamamento em condições de alta fertilidade. É um cultivar com excelente qualidade culinária, contudo, para que se obtenha uma boa porcentagem de grãos inteiros no beneficiamento, é necessário que a colheita seja feita com a umidade dos grãos entre 20% e 24%. A

produtividade do cultivar é estável e satisfatória em variadas condições de cultivo, exceto nos casos de incidência de brusone (CASTRO et al., 2003).

- BRS Sertaneja: possui grãos de boa qualidade (longo-fino), as plantas são vigorosas, e são relativamente altas, moderadamente perfilhadora e com moderada resistência ao acamamento. Ainda possui colmos grossos e panículas grandes que facilitam o corte e trilha manuais, tendo assim, boas características para uso na agricultura familiar. Ainda se adapta a diversas condições de cultivo, incluindo renovação de pastagens, rotação de culturas em áreas já cultivadas e uso na integração lavoura-pecuária. O potencial produtivo é de 6.000 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA).
- Maravilha: apresenta estrutura de planta moderna, com folhas e colmos eretos, o que lhe confere melhor aproveitamento da radiação solar e, conseqüentemente, maior capacidade fotossintética. Apresenta alto rendimento de grãos inteiros no beneficiamento (59,2%) e grãos classificados como tipo longo-fino. Não é resistente ao estresse hídrico, por outro lado, com disponibilidade de irrigação suplementar (aspersão e ou pivô central) obtém alta produtividade. Por ser resistente ao acamamento e responsiva à fertilidade, é recomendada para cultivo com alta tecnologia. Seu crescimento inicial é lento, o que, somado à sua arquitetura de folhas eretas, torna-a pouco competitiva com plantas daninhas, exigindo, portanto, um bom controle. Seus grãos são do tipo agulhinha. É moderadamente resistente à brusone e à escaldadura (EMBRAPA, 1997). O cultivar é reconhecidamente suscetível a presença de Al<sup>3+</sup> (MENDONÇA et al., 2003).
- IAC 202: planta com arquitetura moderna e porte baixo, grão longos, finos, translúcidos, resistente ao acamamento. Apresenta produtividade média de 4,3 t ha<sup>-1</sup>, com alto rendimento de grãos inteiros no beneficiamento (62%), ainda apresenta excelentes qualidades culinárias para o padrão do consumidor brasileiro (BASTOS et al., 2000).
- AN Camará: planta de porte médio, com moderada resistência ao acamamento, florescimento ocorrendo aos 75 dias e o ciclo é de 105 dias. Apresenta grãos do tipo longo fino, com alta qualidade e bom rendimento de inteiros (56%). Seu potencial produtivo é de 4,5 t ha<sup>-1</sup> (AGRONORTE, 2014a).

- ANa 7007: planta de porte baixo, resistência moderada ao acamamento, florescimento ocorre aos 80 dias e o ciclo é de 107 dias. O cultivar tem grãos longos e finos, com bom rendimento de inteiros (57%). O cultivar tem alto potencial produtivo, cerca de 7,0 t ha<sup>-1</sup> (AGRONORTE, 2014b).

### **5.2.3. Instalação e condução do experimento**

O experimento foi instalado no dia 17 de maio de 2013 preparando as sementes para pré germinar como descrito por Freitas (2011). Passados 4 dias as sementes foram levadas para solução a 1/5 da força iônica visando a emergência das plântulas. Sendo realizado o transplante das plântulas para solução ½ força iônica sete dias após. Aos 7 DAT a solução foi trocada adicionando solução nutritiva força total descrita por Furlani e Furlani (1988) e adaptada por Zonta (2003) (Tabela 1), ficando nessas condições até 21 DAT. Após esse período, foram adicionados os tratamentos com Al<sup>3+</sup>. As plantas foram cultivadas com os tratamentos até 42 DAT, sendo realizada a colheita do experimento. É importante citar que foi utilizado aquecedores na casa de vegetação visando manter a temperatura em aproximadamente 25 °C.

Foi realizado um segundo experimento teste de cultivares de arroz de terras altas. O experimento consistiu em cultivar os mesmos cultivares avaliados no experimento 2, em vasos com solo alumínico (m% > 50%), visando avaliar número de panículas por planta, produção de grãos, massa seca da parte aérea e índice de colheita dos cultivares sob estresse por Al<sup>3+</sup>.

O solo utilizado no experimento foi de baixa fertilidade natural, classificado como Latossolo Vermelho Escuro, textura média arenosa (CARVALHO et al., 1983), que apresentava as seguintes características químicas antes da instalação do experimento: 2 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo; 13 g dm<sup>-3</sup> de MO; 4,1 pH em CaCl<sub>2</sub>; 1; 2; 1; 60; 10; 65 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de K, Ca, Mg, H+Al, Al<sup>3+</sup>, CTC respectivamente; e V% = 7.

#### **5.2.2.1. Manejo da solução nutritiva e experimento**

Realizado como descrito no item 5.1.2.1.

#### **5.2.4. Avaliações**

##### **5.2.4.1. Comprimento, área de superfície, volume, diâmetro médio radicular e comprimento em cada classe de diâmetro**

Realizado como descrito no item 5.1.3.1.

#### **5.2.4.2. Altura e número de perfilhos por planta**

Realizado como descrito no item 5.1.3.2.

#### **5.2.4.3. Produção de massa seca do sistema radicular, parte aérea e total**

Realizado como descrito no item 5.1.3.3.

#### **5.2.4.4. Índice “S” de susceptibilidade ao Al<sup>3+</sup>**

Foi adotado o índice de susceptibilidade S, de Fisher e Maurer (1978), adaptado por Guimarães et al. (2006) para estresse de Al<sup>3+</sup>, conforme as seguintes equações:

$$IS=(Y_i-Y_s)/(Y_i \times D);$$

$$D=1-Y_{ms}/Y_{mi},$$

Sendo,

D - severidade do estresse aplicado; Y<sub>i</sub> e Y<sub>s</sub> os comprimentos radiculares sem e com estresse, respectivamente; Y<sub>ms</sub> e Y<sub>mi</sub> os comprimentos médios do experimento, com e sem estresse, respectivamente.

Quanto menor o S, menos afetado pelo nível de estresse induzido pela toxidez por Al<sup>3+</sup>. Foi feito o cálculo do índice de susceptibilidade do crescimento radicular (SRcm).

Para finalidade de seleção, as linhagens foram distribuídas em quartis, delimitados pela média do comprimento das raízes, sem o estresse de toxicidade de Al<sup>3+</sup>, acrescida de 75% do seu desvio padrão, e a média do seu índice de susceptibilidade à toxicidade de Al<sup>3+</sup> diminuído de 25% do seu desvio padrão.

#### **5.2.4.5. Panículas por planta e produção de massa seca da parte aérea (experimento com solo)**

Por ocasião da colheita, foi realizada a contagem das panículas contidas em cada unidade experimental, em seguida, foi determinado o número panículas por planta, mediante a relação entre número total de panículas e o número total de plantas.

Quanto à produção de massa seca da parte aérea, no momento da colheita após separar os grãos de todas as plantas do vaso, foi coletada toda a parte aérea

restante de cada parcela para determinação de massa seca da parte aérea (sem os grãos). A seguir as amostras foram levadas à estufa com circulação forçada de ar, a 65°C até peso constante e por fim pesadas.

#### **5.2.4.6. Produção de grãos e índice de colheita (experimento com solo)**

Após a colheita do experimento, as panículas foram separadas manualmente e o material foi limpo, separando palha e os grãos chochos através do fluxo de ar. Em seguida, foi determinada a produção de grãos por vaso a 13% de umidade.

O índice de colheita foi determinado através da relação produção de grãos / produção de massa seca da parte aérea + massa de grãos.

#### **5.2.5. Análise estatística**

Para finalidade de seleção, as linhagens foram distribuídas em quartis, delimitados pela média do comprimento radicular sem o estresse ao  $Al^{3+}$ , acrescida de 75% do seu desvio padrão, e a média do seu índice de susceptibilidade à toxicidade de  $Al^{3+}$  diminuído de 25% do seu desvio padrão. Para as demais variáveis, os resultados do experimento foram submetidos à análise de variância. As médias do experimento referentes aos diferentes cultivares com e sem  $Al^{3+}$  foram comparadas pelo teste Scott Knott a 5% de probabilidade.

### **5.3. Experimento 3: avaliação de linhagens de mamona quanto a tolerância ao alumínio**

#### **5.3.1. Delineamento experimental**

O experimento teve por objetivo caracterizar as linhagens de mamona pertencentes ao programa de melhoramento genético da FCA quanto sua tolerância ao  $Al^{3+}$  e selecionar linhagem tolerante e suscetível ao  $Al^{3+}$  para utilização no experimento 5. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial 2x9, com quatro repetições. Os tratamentos foram com e sem  $Al^{3+}$  ( $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ ) e nove linhagens de mamona. As linhagens testadas foram CRZ H06, CRZ H11, CRZ H12, CRZ H15, CRZ H17, CRZ H18, CRZ H19, CRZ H22 e FCA. A linhagem Guarani estava entre as linhagens testadas, no entanto não obteve germinação satisfatória, sendo assim, retirada do teste.

### 5.3.2. Instalação e condução do experimento

Devido ao fato de não existir solução nutritiva adequada para plantas de mamona, especialmente para experimentos de toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ , utilizou-se solução nutritiva descrita por Furlani e Furlani (1988) para plantas de milho (Tabela 2). Realizou-se previamente pré-teste a fim de verificar a eficiência da solução citada na nutrição e crescimento de plantas de mamona, sendo positiva a resposta. Segue na Tabela 2 a descrição da solução nutritiva utilizada no experimento. Utilizou-se  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  para gerar toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  nas plantas de mamona.

**Tabela 2.** Composição da solução estoque e solução nutritiva utilizada para estudo de tolerância de plantas de mamona ao alumínio

Solução estoque		Sol.estoque L <sup>-1</sup> da Sol.Nutritiva	Solução nutritiva básica	
Componentes	Concentração g L <sup>-1</sup>	Mamona ml L <sup>-1</sup>	Nutrientes	Concentração mg L <sup>-1</sup>
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	270,0	3,1	Ca	139,9
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	33,8		K	84,9
KCl	18,6	2,2	Mg	21,0
$\text{K}_2\text{SO}_4$	44,0		N- $\text{NO}_3^-$	141,1
$\text{KNO}_3$	24,6		N- $\text{NH}_4^+$	18
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	142,6	1,6	P	1,0
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	17,6	0,3	S	17,4
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	24,1	0,6	Cl	19,2
NaEDTA	25,1		Fe	3,0
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2,34	0,6	Mn	0,39
$\text{H}_3\text{BO}_3$	2,04		B	0,22
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,88		Zn	0,12
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,20		Cu	0,03
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,26		Mo	0,06
$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	71,53	3,7	Al	30,00

O experimento foi instalado dia no dia 22 de abril de 2013 preparando as sementes para pré germinar de acordo como descrito por Freitas (2011), com algumas adaptações, devido ao tamanho das sementes de mamona com relação as sementes de arroz. As sementes foram espaçadas cerca de 2 cm entre si nos papéis germinador.

Passados quatro dias as sementes foram levadas para solução a 1/5 da força iônica visando a emergência das plântulas. Sendo realizado o transplante das plântulas para solução 1/2 força iônica 15 dias após. Aos sete DAT a solução foi trocada adicionando solução nutritiva força total descrita para milho por Furlani e Furlani 1988,

permanecendo nessas condições por sete dias. Após esse período foram adicionados os tratamentos com  $Al^{3+}$ , as plantas foram cultivadas com os tratamentos até 21 DAT, sendo realizada a colheita do experimento. Foram utilizados aquecedores na casa de vegetação visando manter a temperatura em 25 °C.

#### **5.3.2.1. Manejo da solução nutritiva e experimento**

O manejo da solução nutritiva foi realizado como descrito no item 5.1.2.1. A única alteração foi o número de plantas utilizado, foram utilizadas três plantas por vaso para o presente experimento.

#### **5.3.3. Avaliações**

##### **5.3.3.1. Comprimento, área de superfície, volume, diâmetro médio radicular e comprimento em cada classe de diâmetro**

Realizado como descrito no item 5.1.3.1.

##### **5.3.3.2. Altura e diâmetro do caule**

Altura realizada como descrito no item 5.1.3.2. Visando obter o diâmetro médio do caule das plantas de mamona, as três plantas do vaso foram avaliadas com auxílio de paquímetro. Aferiu-se a base das plantas, aproximadamente um centímetro acima do isopor.

##### **5.3.3.3. Produção de massa seca do sistema radicular, parte aérea e total**

Realizado como descrito no item 5.1.3.3.

##### **5.3.3.4. Índice “S” de susceptibilidade ao $Al^{3+}$**

Realizado como descrito no item 5.2.4.4.

#### **5.3.4. Análise estatística**

Realizado como descrito no item 5.2.5.

### **5.4. Experimento 4: interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de Si)**

#### **3.4.1. Delineamento experimental**

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial 2x4, com quatro repetições, utilizando solução nutritiva. Os tratamentos foram dois cultivares de arroz de terras altas (ANa 7007 - tolerante e Maravilha não tolerante ao  $Al^{3+}$ ) e combinações de Si e  $Al^{3+}$  (1 – sem Si e sem  $Al^{3+}$ ; 2 – com Si e sem  $Al^{3+}$ ; 3 – sem Si e com  $Al^{3+}$ ; 4 – com Si e com  $Al^{3+}$ ).

A concentração de Si e  $Al^{3+}$  utilizada durante o crescimento das plantas foi  $1,7 \text{ mmol L}^{-1}$  e  $1,4 \text{ mmol L}^{-1}$ , respectivamente. No entanto, para as coletas de exaustão, foram utilizadas concentrações de  $0,11 \text{ mmol L}^{-1}$  de Si e  $0,19 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $Al^{3+}$ , estas que foram definidas em experimento pré-teste realizado antes do presente experimento. Essa definição se explica, porque levou-se em consideração a escolha de uma concentração que fosse viável finalizar as coletas em ao menos 24 horas.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de potássio, sendo o potássio retirado em coluna catiônica, a concentração final de Si na solução estoque era de  $156000 \text{ mg dm}^{-3}$ . A fonte de  $Al^{3+}$  utilizada para gerar toxidez às plantas foi o  $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ .

### **3.4.2. Instalação e condução do experimento**

O experimento foi instalado dia 13 de julho de 2013 germinando as sementes como descrito em Freitas (2011). Passados três dias os rolinhos foram transferidos para solução nutritiva a 1/5 visando a emergência das plântulas de arroz. Após sete dias, as plântulas foram transferidas para vasos contendo 4 L de solução nutritiva 1/2 da força descrita por Furlani e Furlani (1988) adaptada por Zonta (2003) (Tabela 1), ficando sete dias em contato com essa solução. Aos sete DAT a solução nutritiva foi substituída por outra com força total sem os tratamentos. Em seguida, em 21 DAT foram adicionados os tratamentos de crescimento. As plantas permaneceram em crescimento com os tratamentos até 35 DAT quando foram realizadas as coletas para as avaliações de cinética de absorção (descrita no item 5.4.3.6). Aos 37 DAT foi realizada a colheita do experimento e as demais avaliações.

#### **5.4.2.1. Manejo da solução nutritiva e experimento**

Foi realizado como descrito no item 5.1.2.1.

#### **5.4.3. Avaliações**

##### **5.4.3.1. Comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular**



Foi realizado como descrito no item 5.1.3.1.

#### **5.4.3.2. Altura e número de perfilhos por plantas**

Foi realizado como descrito no item 5.1.3.2.

#### **5.4.3.3. Produção de massa seca do sistema radicular, parte aérea e total; e teor e acúmulo de nutrientes**

Foi realizado como descrito no item 5.1.3.3. Também foi realizada a determinação do teor e acúmulo Si na parte aérea e sistema radicular de acordo com a metodologia proposta por Korndörfer (2004).

#### **5.4.3.4. Eficiência de absorção, eficiência de utilização do silício e alumínio e relação raiz/parte aérea**

Foi determinada a eficiência de absorção (quantidade de nutriente absorvido por metro de raiz), através da razão: quantidade acumulada de Si na parte aérea/comprimento radicular. E a eficiência de utilização do silício pela relação: massa seca da parte aérea/quantidade acumulada de Si na parte aérea.

A relação raiz/parte aérea foi determinada através da divisão da massa seca da raiz pela massa seca da parte aérea.

#### **5.4.3.5. Parâmetros cinéticos de absorção ( $V_{max}$ , $K_m$ e $C_{min}$ )**

Após 40 dias de cultivo das plantas sob os tratamentos, foi realizada a avaliação de cinética de absorção, estudando absorção de Si e  $Al^{3+}$  na solução de exaustão em função do tempo, de acordo com técnica (esgotamento) descrita por Claassen e Barber (1974).

Iniciou-se o estudo substituindo a solução nutritiva de crescimento por solução de mesma composição, no entanto, sem Si e  $Al^{3+}$ , permanecendo nesta por 48 horas, visando aumentar a capacidade da planta em absorver os elementos em estudo. Em seguida, substituiu-se a solução novamente por outra contendo mesma composição, mas adicionando  $0,11 \text{ mmol L}^{-1}$  de Si e  $0,19 \text{ mmol L}^{-1}$  de  $Al^{3+}$ , fazendo com que os carregadores das raízes atingissem estado estacionário de absorção, esta técnica sendo essencial para início das coletas de cinética (EPSTEIN; HAGEN, 1952).

Após uma hora, substituiu novamente a solução nutritiva, por outra de mesma composição e  $0,11 \text{ mmol L}^{-1}$  de Si e  $0,19 \text{ mmol L}^{-1}$  de Al em todos os tratamentos, e iniciaram as coletas. Coletou-se alíquotas de 10 ml a cada 30 minutos nas primeiras seis horas; a cada 60 minutos nas seis horas seguintes; por fim, mais quatro coletas a cada 12 horas, visando garantir a obtenção do Cmin. Ressalta-se, que o volume dos vasos foi mantido constante, repondo com água deionizada a amostra de solução retirada. A temperatura da solução durante o experimento de exaustão foi monitorada (temperatura média -  $22,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ainda, o pH foi ajustado ( $4 \pm 0,1$ ), se necessário, a cada uma hora.

Foi determinada via ICP a concentração de Si e  $\text{Al}^{3+}$  nas amostras de solução de exaustão. Com as concentrações de Si e  $\text{Al}^{3+}$  nas amostras e valores de massa seca de raiz foram estimados os valores de Km e Vmax, via software CinéticaWin - versão para o Windows do Cinética 1.2 (RUIZ; FERNANDES FILHO, 1992). Este que indica quanto de Si e  $\text{Al}^{3+}$  na solução (Q) em função do tempo (t) representando em forma de gráficos duas equações (regressão linear e exponencial), selecionando a que teve melhor ajuste aos dados. O Vmax e Km foram obtidos a partir de equação linear.

O valor de Cmin foi considerado quando 24 horas após o início das amostragens, as concentrações de Si e  $\text{Al}^{3+}$  tenderam a permanecerem constantes. Ainda, foi considerada a média das três últimas amostragens para obtenção do Cmin.

Após obtenção dos valores de Vmax, Km e Cmin calculou-se o influxo líquido de Si ( $0 \text{ a } 120 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ ) e  $\text{Al}^{3+}$  ( $0 \text{ a } 200 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ ), com base na equação descrita por Nielsen e Barber (1978):

$$\text{Influxo líquido} = \text{Vmax} (\text{C}-\text{Cmin}) / \text{Km} + (\text{C}-\text{Cmin})$$

- Vmax - velocidade máxima de absorção,
- Km - constante de Michaelis Menten,;
- C - concentração de Si/ $\text{Al}^{3+}$  na solução nutritiva
- Cmin - concentração em que o influxo líquido é zero

#### **5.4.3.6. Identificação e determinação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular exsudados**

Foi identificada a presença ou não de ácidos orgânicos de baixo peso molecular exsudados pelas raízes na solução nutritiva e posteriormente quantificados. As amostras foram coletadas antes da colheita do experimento e em seguida armazenadas

em frascos âmbar na geladeira a 5°C. Foi realizada então a filtração em membrana 0,47 mm e injetado num sistema de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE). A coluna utilizada foi a de troca iônica (300 x 7,8 mm), e, como fase móvel foi utilizada uma solução de ácido fosfórico 0,1%.

Verificou-se a existência ou não dos seguintes ácidos orgânicos na solução nutritiva coletadas: ácido acético, propiônico, butírico, málico, tartárico, oxálico e cítrico. As análises foram realizadas junto ao Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia – NUPAM/FCA, UNESP-Botucatu.

#### **5.4.3.7. Morfologia externa de raiz (Coloração de raízes)**

A intensidade de acúmulo do  $Al^{3+}$  nas raízes dos cultivares foi analisada pela coloração dos ápices com hematoxilina férrica. Após exposição das plantas a seus respectivos tratamentos com  $Al^{3+}$ , estas foram coletadas, e pequena porção de raízes foram mergulhadas em solução de hematoxilina férrica 0,2% (p/v) em  $NaIO_3$  0,02% (p/v), durante 15 min (POLLE et al., 1978).

Visando eliminar o excesso do corante, após o contato com a hematoxilina férrica, as plantas foram transferidas para recipientes contendo água deionizada, durante 30 minutos. Em seguida, as raízes foram coletadas e fotografadas em estéreo-microscópio BX92.

#### **5.4.3.8. Espessura de parede celular (Morfologia interna de raiz - corte histológico de raiz)**

As raízes para as análises microscópicas foram cuidadosamente selecionadas, levando em consideração região da raiz mais jovem e ainda em crescimento, pois, é possível garantir que estas sofreram ação tóxica causada pelo  $Al^{3+}$ . Ainda, para os cortes transversais foram selecionadas porções da raiz a cerca de três cm do ápice.

As amostras de raiz de plantas de arroz foram fixadas em FAA 50% (JOHANSEN, 1940) por 24 horas, desidratadas em série etílica e embebidas em resina metacrilato (GERRITS, 1991). Secções transversais e longitudinais com 6µm de espessura obtidas em micrótomo rotativo semi-automático foram coradas com Azul de toluidina 0,05%, pH 4,3 (O'BRIEN, 1964); lâminas permanentes foram montadas com Entellan. Os aspectos mais relevantes foram documentados em fotomicroscópio Leica acoplado a sistema de captura de imagens. O diâmetro da raiz, espessura do córtex,

espessura da parede do xilema e número de elemento de vaso (xilema) foram mensurados em secções transversais com auxílio do software Cell B Olympus – Imaging Software for Life Science Microscopy.

Ainda, realizou-se descrição visual das raízes com base nas secções transversais e longitudinais.

#### **5.4.3.9. Acúmulo de lignina (Parâmetros bioquímicos)**

O teor de lignina nos tecidos foi determinado pelo método proposto por Morrison (1972) e modificado por Fukuda e Komamine (1982), com a utilização de brometo de acetila e hidroxilamina-HCl. O teor de lignina foi expresso em unidades de absorvância a 280 nm por mg de matéria seca (SASAKI et al., 1996).

#### **5.4.3.10. Teores de compostos fenólicos solúveis (Parâmetros bioquímicos)**

O teor de compostos fenóis totais foi quantificado pelo método de Folin-Ciocalteu, proposto por Singleton et al. (1999). Foram pesadas amostras de massa seca (parte aérea e raiz). Em seguida foi realizada dupla extração com acetona 50%. Para a reação foram utilizados 0,1 mL de sobrenadante, 0,9 mL de H<sub>2</sub>O deionizada, 0,5 mL de Folin-Ciocalteu e 2,5 mL de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a 20%. A leitura de absorvância foi realizada em espectrofotômetro a 725 nm. Os resultados foram expressos em equivalente de ácido gálico (mg 100 g<sup>-1</sup> matéria fresca).

#### **5.4.4. Análise estatística**

Os resultados do experimento foram submetidos à análise de variância. Os dados foram submetidos a análise por teste t (DMS) a 5% de significância para comparação das médias.

### **5.5. Experimento 5: interação silício e alumínio em plantas de mamona (cultura não acumuladora de Si)**

#### **5.5.1. Delineamento experimental**

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, disposto em modelo fatorial 2x4, com quatro repetições, utilizando solução nutritiva. Os tratamentos foram duas linhagens de mamona, CRZ 6 (Tolerante ao Al<sup>3+</sup>) e CRZ 18 (suscetível ao Al<sup>3+</sup>) e combinações de Si e Al<sup>3+</sup> (1 – sem Si e sem Al<sup>3+</sup>; 2 – com Si e sem

Al<sup>3+</sup>; 3 – sem Si e com Al<sup>3+</sup>; 4 – com Si e com Al<sup>3+</sup>). Foram utilizados linhagens de mamona do programa de melhoramento genético da Faculdade de Ciências Agronômicas, estes foram selecionados previamente quanto a tolerância ao Al<sup>3+</sup> (experimento 3).

As concentrações de Si e Al<sup>3+</sup> utilizadas durante o desenvolvimento das plantas foram 1,7 mmol L<sup>-1</sup> e 1,1 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente. A fonte de Si utilizada foi a mesma utilizada no experimento 4. No entanto, para as coletas de exaustão, foram utilizadas concentrações de 0,06 mmol L<sup>-1</sup> de Si e 0,2 mmol L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup>, estas que foram definidas em experimento pré teste realizado antes do presente experimento, levou-se em consideração a escolha de determinada concentração que fosse viável finalizar as coletas em ao menos 24 horas.

### **5.5.2. Instalação e condução do experimento**

Com a finalidade de se obter plantas para o experimento, as sementes foram colocadas para germinar no dia 17 de julho de 2013, em germinador à temperatura média de 25°C com 8 horas de luz.

Passados quatro dias os rolinhos com as sementes foram transferidos para solução nutritiva a 1/5 visando emergência das plântulas de mamona. Após 10 dias, as plântulas foram transferidas para vasos contendo 4 L de solução nutritiva 1/2 da força descrita por Furlani e Furlani (1988) (Tabela 2), ficando sete dias em contato com essa solução. Após esse período a solução foi substituída por força total sem os tratamentos, permanecendo assim até 21 DAT, quando foram adicionados os tratamentos. As plantas permaneceram em crescimento com os tratamentos até 30 DAT, quando foram realizadas as coletas para avaliação de cinética de absorção (descrita no item 5.5.3.5). Aos 33 DAT o experimento foi colhido visando às demais avaliações descritas no item 5.5.3.

#### **5.5.2.1. Manejo da solução nutritiva e experimento**

Foi realizado como descrito no item 5.1.2.1.

### **5.5.3. Avaliações:**

#### **5.5.3.1. Comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular**

Foi realizado como descrito no item 3.1.3.1.

#### **5.5.3.2. Altura de plantas e diâmetro do caule**

Foi realizado como descrito no item 5.3.3.2.

#### **5.5.3.3. Produção de massa seca do sistema radicular, parte aérea e total; e teor e acúmulo de nutrientes**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.3.

#### **5.5.3.4. Eficiência de absorção, eficiência de utilização do silício e alumínio e relação raiz/parte aérea**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.4.

#### **5.5.3.5. Parâmetros cinéticos de absorção ( $V_{max}$ , $K_m$ e $C_{min}$ )**

Após 30 dias de cultivo das plantas de mamona, foi realizada a avaliação de cinética de absorção, no geral, como descrito no item 5.4.3.5.

No entanto, as concentrações de Si e  $Al^{3+}$  utilizadas na avaliação de exaustão foram diferentes, sendo elas  $0,06 \text{ mmol L}^{-1}$  e  $0,2 \text{ mmol L}^{-1}$ , respectivamente. Outra diferença foi a temperatura média da solução nutritiva durante o experimento de exaustão com plantas de mamona, sendo esta  $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **5.5.3.6. Identificação e determinação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular exsudados**

Foi realizado como descrito no item 4.1.3.5.

#### **5.5.3.7. Morfologia externa de raiz (Coloração de raízes)**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.7.

#### **5.5.3.8. Espessura de parede celular (Morfologia interna de raiz - corte histológico de raiz)**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.8.

#### **5.5.3.9. Acúmulo de lignina (Parâmetros bioquímicos)**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.9.

#### **5.5.3.10. Teores de compostos fenólicos solúveis (Parâmetros bioquímicos)**

Foi realizado como descrito no item 5.4.3.10.

#### **5.5.4. Análise estatística**

Os resultados do experimento foram submetidos à análise de variância. Os dados foram submetidos a análise por teste t (DMS) a 5% de significância para comparação das médias.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Experimento 1: fontes e doses de alumínio para utilização em experimentos com arroz de terras altas em solução nutritiva

As concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  estudadas 0; 370; 740; 1.110 e 1.480  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , corresponderam a atividade de  $\text{Al}^{3+}$  em solução de: 0; 85,1; 144,1; 191,2; 229,7  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  na fonte sulfato de alumínio e potássio (Tabela 3), respectivamente e 0; 117,6; 233,0; 336,8; 429,0  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  para cloreto de alumínio (Tabela 4).

**Tabela 3.** Concentrações, atividade e disponibilidade de alumínio em solução nutritiva utilizando sulfato de alumínio e potássio ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0

Concentrações de $\text{Al}^{3+}$ mg $\text{dm}^{-3}$	Concentrações de $\text{Al}^{3+}$ ----- $\mu\text{mol L}^{-1}$	Atividade de $\text{Al}^{3+}$ em solução	Disponibilidade de $\text{Al}^{3+}$ em solução %
0	0	0	0
10	370	85,1	50,7
20	740	144,1	45,5
30	1110	191,2	42,3
40	1480	229,7	39,8

A disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  em solução estimada quando se utilizou o  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  nas concentrações estudadas, foram de 0; 50,74; 45,54; 42,32; 39,81% (Tabela 3). Ao utilizar o  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  foi de 0; 72,42; 78,41; 81,92; 84,20% (Tabela 4), respectivamente. Com esses resultados, fica claro que com a utilização de cloreto de alumínio há maior atividade e disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  (forma tóxica as plantas) em comparação ao sulfato de alumínio e potássio, além da não presença dos macronutrientes K e S em sua composição.



**Tabela 4.** Concentrações, atividade e disponibilidade de alumínio em solução nutritiva utilizando cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0

Concentrações de $\text{Al}^{3+}$	Concentrações de $\text{Al}^{3+}$	Atividade de $\text{Al}^{3+}$ em solução	Disponibilidade de $\text{Al}^{3+}$ em solução
$\text{mg dm}^{-3}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$		%
0	0	0	0
10	370	117,6	72,4
20	740	233,0	78,4
30	1110	336,8	81,9
40	1480	429,0	84,2

O  $\text{Al}^{3+}$  pode sofrer transformações na solução e ficar em formas não tóxicas às plantas, segundo estimativa gerada através do software MINTEQ. Aplicando-se  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  o alumínio está nas formas de  $\text{Al}^{3+}$ ;  $\text{AlOH}^{2+}$ ;  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ;  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ;  $\text{AlSO}_4^+$ ;  $\text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$ ;  $\text{AlHPO}_4^+$ ;  $\text{Al}_2\text{PO}_4^{3+}$  na solução nutritiva (Tabela 5), com destaque para o  $\text{AlSO}_4^+$  (forma não tóxica às plantas), forma esta que representa 42% do alumínio disponível em solução (dose 370  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Al), e 55% (1480  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Al). Por outro lado, aplicando  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  o Al encontra-se nas formas de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{AlOH}^{2+}$ ;  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ;  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ;  $\text{AlCl}^{2+}$ ;  $\text{AlSO}_4^+$ ;  $\text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$ ;  $\text{AlHPO}_4^+$ ;  $\text{Al}_2\text{PO}_4^{3+}$  (Tabela 6).

**Tabela 5.** Formas de alumínio na solução nutritiva em diferentes concentrações, utilizando sulfato de alumínio e potássio ( $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0

Formas (Al)	370	740	1110	1480
	$\mu\text{mol L}^{-1}$			
	%			
$\text{Al}^{3+}$	50,7	45,5	42,3	39,8
$\text{AlOH}^{2+}$	3,2	2,8	2,5	2,3
$\text{Al}(\text{OH})_2^+$	0,1	0,1	0,09	0,08
$\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$	0,03	0,05	0,06	0,07
$\text{AlSO}_4^+$	42,4	48,8	52,4	55,1
$\text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$	0,5	0,8	1,1	1,4
$\text{AlHPO}_4^+$	2,1	1,1	0,7	0,5
$\text{Al}_2\text{PO}_4^{3+}$	0,6	0,6	0,5	0,5

Esses resultados demonstram maior capacidade do cloreto de alumínio em gerar toxidez em plantas, especialmente devido ao fato de proporcionar maior atividade e disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  em solução. Ainda, a utilização do sulfato de alumínio e potássio em experimentos de solução nutritiva pode não ser interessante, devido a baixa atividade, disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  (forma tóxica) e formação de compostos não tóxicos as

plantas ( $\text{AlSO}_4^+$ ), além do que, pode fornecer K e S às plantas se não for realizado balanceamento da solução nutritiva. Este último fator pode interferir negativamente em experimentos com doses de  $\text{Al}^{3+}$  se não for realizado balanceamento dos elementos, uma vez que ao aumentar a dose de  $\text{Al}^{3+}$ , as concentrações de K e S na solução nutritiva é alterada, influenciando o resultado do experimento.

**Tabela 6.** Formas de alumínio na solução nutritiva em diferentes concentrações, utilizando cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), estimadas pelo software VISUAL MINTEQ 3.0

Formas (Al)	370	740	1110	1480
	----- $\mu\text{mol L}^{-1}$ -----			
	----- % -----			
$\text{Al}^{+3}$	72,4	78,4	81,9	84,2
$\text{AlOH}^{+2}$	4,6	4,7	4,7	4,6
$\text{Al}(\text{OH})_2^+$	0,1	0,1	0,1	0,1
$\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$	0,06	0,1	0,2	0,3
$\text{AlCl}^{+2}$	0,02	0,04	0,06	0,07
$\text{AlSO}_4^+$	19,3	14,3	11,2	9,2
$\text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$	0,08	0,04	0,03	0,02
$\text{AlHPO}_4^+$	2,2	1,0	0,6	0,4
$\text{Al}_2\text{PO}_4^{+3}$	1,0	1,0	0,9	0,8
$\text{Al}_3(\text{OH})_4^{+5}$	-*	-*	0,02	0,04

\* Nas concentrações de Al 370 e 740  $\mu\text{mol L}^{-1}$  não há presença de  $\text{Al}_3(\text{OH})_4^{+5}$

Avaliando as variáveis de crescimento é possível inferir que o cloreto de alumínio foi capaz de gerar maior toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas (Tabela 7 e 8). Houve menor produção de massa seca de raiz e total ao utilizar cloreto de alumínio em comparação ao sulfato de alumínio e potássio (Tabela 7). Além disso, os parâmetros de raízes avaliados, como área de superfície e volume de raiz foram inferiores ao utilizar a fonte cloreto de alumínio (Tabela 8).

**Tabela 7.** Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, massa seca da parte aérea, raiz e total de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $\text{AlCl}_3$ )

Fontes	Altura de plantas	Número de perfilhos por planta	MS – Parte aérea	MS – Raiz	MS – Total
	cm	n°	----- $\text{g vaso}^{-1}$ -----		
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	54,4	2,9	7,6	3,2a	10,8a
$\text{AlCl}_3$	54,2	2,9	7,5	2,8b	10,4b
CV(%)	5,3	4,1	5,2	12,9	4,4

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Por outro lado não houve diferença entre as fontes de  $Al^{3+}$  para altura de plantas, número de perfilhos por planta e massa seca da parte aérea (Tabela 7). No entanto, as variáveis radiculares, são mais importantes para se definir o nível de intensidade da toxidez causada por  $Al^{3+}$ , devido ao fato da raiz ser o alvo primário dessa toxidez (KOCHIAN, 1995).

**Tabela 8.** Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro radicular médio de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $AlK(SO_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $AlCl_3$ )

Fontes	Comprimento	Área de	Volume	Diâmetro
	de raiz	superfície		médio
	m vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> vaso <sup>-1</sup>	mm
$AlK(SO_4)_2$	474,8	4753,1a	38,3a	0,34
$AlCl_3$	436,7	4166,0b	32,1b	0,32
CV(%)	19,9	16,9	17,5	12,2

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Ainda, comprimento e diâmetro radicular não foram diferentes entre si ao comparar as fontes de  $Al^{3+}$  (Tabela 8). Esperava-se menor crescimento radicular para a fonte cloreto de alumínio, em especial devido a menor produção de massa seca radicular obtido por essa fonte (Tabela 7), porém não foi o observado.

Visando obter melhor entendimento do  $Al^{3+}$  sob as raízes, avaliou-se o comprimento radicular em três diferentes classes de diâmetros radiculares (Tabela 9). Observou-se que com a utilização de cloreto de alumínio, o comprimento das raízes médias e grossas foram menores em comparação ao tratamento sulfato de alumínio e potássio. Isso demonstra que o cloreto de alumínio afetou de forma mais drástica as raízes médias e grossas, estas, que são compostas por raízes a partir de 0,5 mm de espessura. Por outro lado, não houve diferença entre as fontes de  $Al^{3+}$  para raízes finas (<0,5 mm).

**Tabela 9.** Média do comprimento radicular dentro de três classes de diâmetro de raízes de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $AlK(SO_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $AlCl_3$ )

Fontes	Finas	Médias	Grossas
	-----m vaso <sup>-1</sup> -----		
$AlK(SO_4)_2$	403,5	58,1a	13,6a
$AlCl_3$	378,4	48,2b	9,9b
CV(%)	21,9	22,3	31,3

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Quanto ao teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea, observou-se que ao utilizar sulfato de alumínio e potássio as plantas apresentam maior teor (Tabela 10) e acúmulo (Tabela 11) de K, Mg e S na parte aérea em comparação a fonte cloreto de alumínio. Explica-se a melhor nutrição da planta por K e S ao utilizar sulfato de alumínio e potássio, devido a este possuir em sua formulação os nutrientes em questão (K e S).

**Tabela 10.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na parte aérea de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $\text{AlCl}_3$ )

Fontes	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	24	0,8b	21a	1,7	0,9a	3,6a
$\text{AlCl}_3$	24	0,9a	19b	1,7	0,8b	2,7b
CV(%)	4,7	3,5	4,9	9,9	4,0	3,4
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	18	18a	145a	125	20a	
$\text{AlCl}_3$	19	14b	132b	122	17b	
CV(%)	6,9	12,5	7,0	8,0	13,5	

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 11.** Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na parte aérea de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $\text{AlCl}_3$ )

Fontes	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	185	6,4b	159a	13	6,6a	27,7a
$\text{AlCl}_3$	183	6,7a	146b	13	6,1b	20,8b
CV(%)	4,9	4,9	4,3	7,9	7,4	5,6
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
	-----µg vaso <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	138	138a	1112a	951a	153a	
$\text{AlCl}_3$	139	107b	1006b	922b	131b	
CV(%)	8,9	12,6	7,7	8,7	15,9	

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Provavelmente devido a melhor nutrição da planta com K e S, ao utilizar sulfato de alumínio e potássio, tenha provocado por consequência maior teor e acúmulo de Mg, Cu, Mn e Zn na fonte de  $\text{Al}^{3+}$  em questão em comparação ao cloreto de alumínio. Ainda, houve maior acúmulo de Fe na parte aérea de plantas submetidas a toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  utilizando sulfato de alumínio e potássio.

Por outro lado, ao utilizar cloreto de alumínio a planta obteve maior teor e acúmulo de P na parte aérea em comparação ao sulfato de alumínio e potássio. No entanto, mesmo melhor nutrida com P, as plantas crescidas com cloreto de alumínio não apresentaram melhora em nenhuma variável de crescimento (Tabela 7 e 8).

Os resultados obtidos para teor e acúmulo de nutrientes em raízes de forma geral acompanharam os obtidos para parte aérea (Tabela 12 e 13). Houve maiores teores e acúmulos de K, Mg e S ao empregar sulfato de alumínio e potássio em comparação ao cloreto de alumínio, devido aos mesmos motivos citados anteriormente.

**Tabela 12.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na raiz de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $\text{AlCl}_3$ )

Fontes	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	18	0,9	21a	0,4	0,5a	2,6a
$\text{AlCl}_3$	18	0,9	17b	0,4	0,4b	2,1b
CV(%)	5,5	6,0	10,56	33,5	13,9	8,8
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	27b	59	32	947	32	
$\text{AlCl}_3$	31a	65	34	852	31	
CV(%)	16,6	18,5	9,3	19,7	20,8	

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Ao contrário do que ocorreu para a parte aérea, houve maior acúmulo de P em raízes sob toxidez quando foi utilizado sulfato de alumínio e potássio (Tabela 13). Isso demonstra que existe algum outro fator desconhecido afetando a translocação de P da raiz para parte aérea nas duas fontes de  $\text{Al}^{3+}$  estudadas. Andrew et al. (1973), Andrew e Vanden Berg (1973) demonstraram que o  $\text{Al}^{3+}$  pode influenciar de modo negativo a translocação de P para parte aérea das plantas.

Houve maior acúmulo de Fe na parte aérea de plantas cultivadas sob sulfato de alumínio e potássio (Tabela 13). O maior acúmulo de Fe na raiz, gerou translocação de forma a manter maior acúmulo de Fe na parte aérea (Tabela 11). Sabe-se que o  $\text{Al}^{3+}$  pode aumentar a disponibilidade de Fe em solos, devido a diminuição do pH e liberação do ferro adsorvido em sítios metabolicamente inativos dentro da planta (MARSCHNER, 1995). Ainda, pode ser que houve maior acúmulo de Fe na parte aérea e raiz de plantas cultivadas sob toxidez por sulfato de alumínio e potássio devido a melhor

nutrição da planta no presente tratamento, em especial o melhor teor e acúmulo de K, Mg e S.

**Tabela 13.** Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro e zinco na raiz de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de fontes de alumínio (sulfato de alumínio e potássio -  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$  e cloreto de alumínio -  $\text{AlCl}_3$ )

Fontes	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	57a	2,9a	67a	1,3	1,6a	8,3a
$\text{AlCl}_3$	50b	2,5b	50b	1,1	1,3b	6,1b
CV(%)	11,5	12,3	14,9	33,2	16,9	17,8
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
	-----µg vaso <sup>-1</sup> -----					
$\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$	85	182	109	3075a	107a	
$\text{AlCl}_3$	88	177	102	2477b	94b	
CV(%)	23,4	12,9	17,0	14,4	17,4	

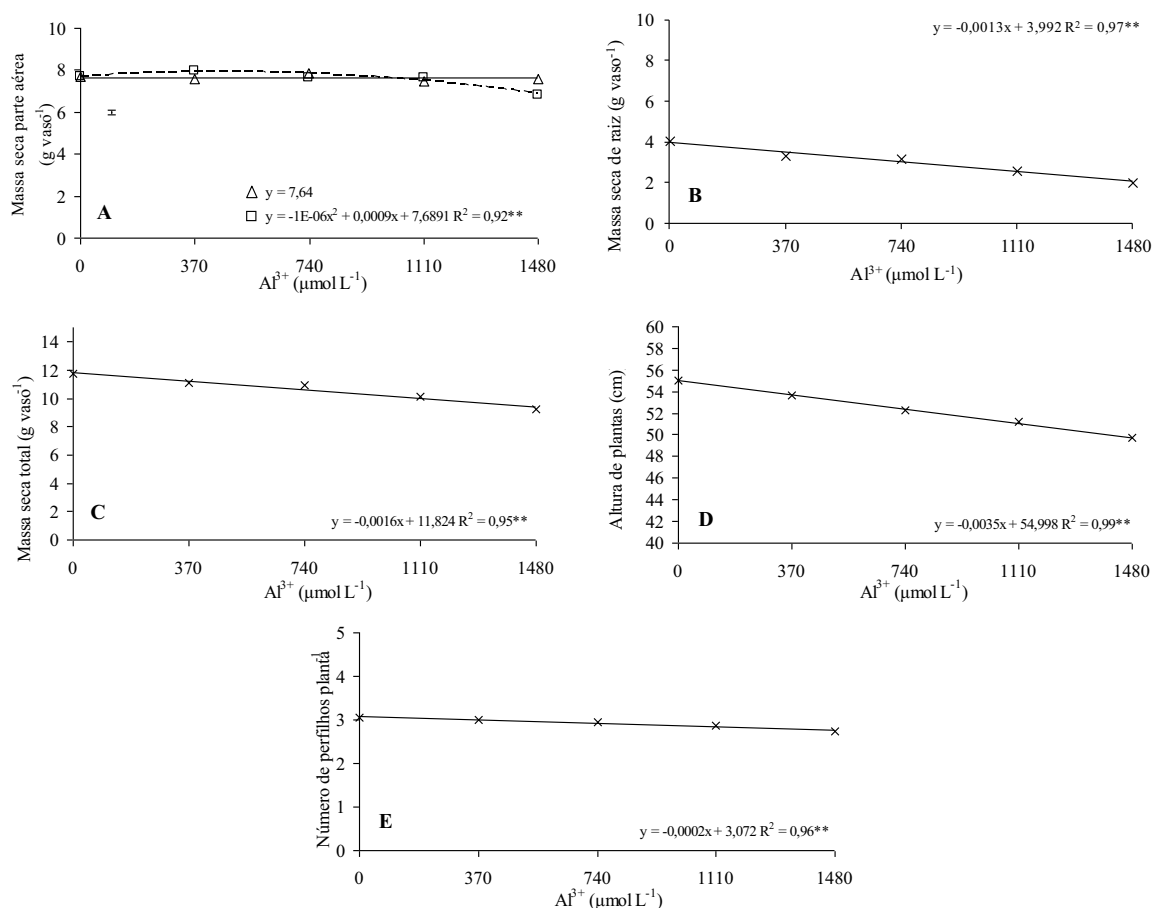
Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

A melhor nutrição de plantas cultivadas sob toxidez por sulfato de alumínio e potássio, especialmente por K e S, pode explicar a maior produção de massa seca da raiz e total obtida por esse tratamento em comparação ao cloreto de alumínio (Tabela 7). Características estas, indesejadas para experimento de toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ , porque busca-se causar dano a planta, e não supri-la com nutrientes (K e S). Dessa forma, pode-se inferir que o cloreto de alumínio é mais eficaz em causar toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas, especialmente pelo fato de este não aumentar as concentrações de K e S na planta, como ocorre com sulfato de alumínio e potássio.

Portanto, sugere-se utilizar a solução nutritiva de Furlani e Furlani (1988), adaptada por Zonta (2003), na qual esta utiliza cloreto de alumínio para gerar toxidez em plantas de arroz. Ainda, sugere-se utilizar o cloreto de alumínio não só para experimentos com arroz, mas também para milho e sorgo, plantas descritas em Furlani e Furlani (1988), além de mamona e outras espécies que necessite testá-las quanto toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ .

Com o aumento da dose de  $\text{Al}^{3+}$  houve decréscimo na produção de massa seca da raiz (Figura 1B) e total (Figura 1C), altura de plantas (Figura 1D) e número de perfilhos por planta (Figura 1E) em ambas fontes de  $\text{Al}^{3+}$  utilizadas. Com relação a produção de massa seca da parte aérea, houve leve acréscimo até a dose de  $370 \mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , no entanto, a partir desse ponto, houve decréscimo, observando maior toxidez

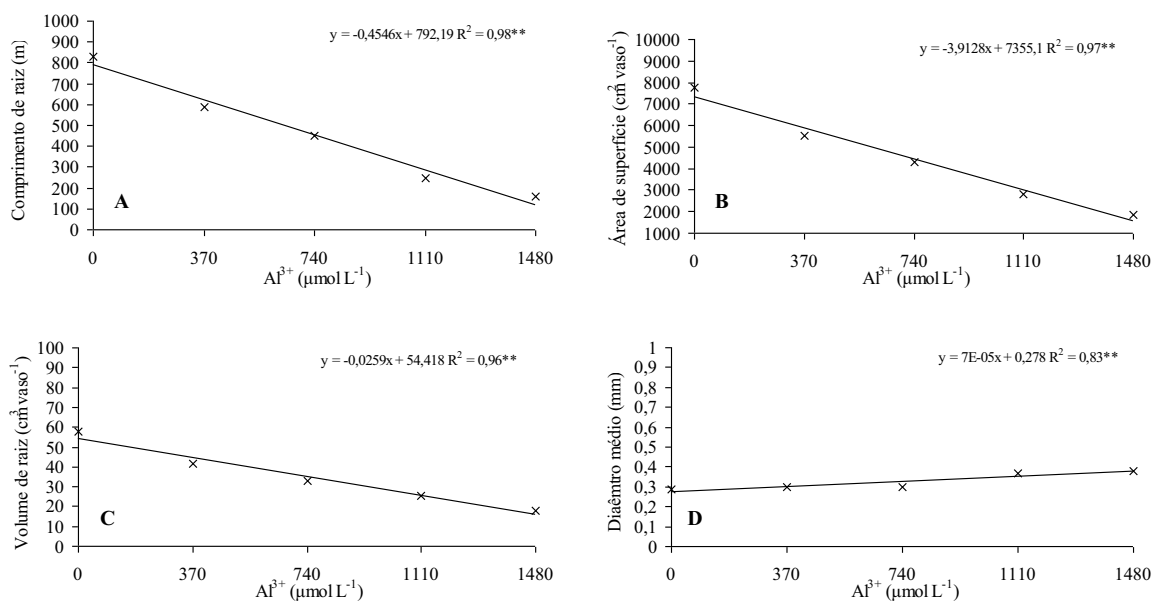
causada na variável em questão na dose de  $\text{Al}^{3+}$   $1480 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Figura 1A). É interessante notar, que o efeito verificado anteriormente, ocorreu somente para a fonte cloreto de alumínio.



**Figura 1.** Produção de massa seca da parte aérea (A), raiz (B) e total (C), altura de plantas (D) e número de perfilhos por planta (E) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes (X).  $** p < 0,01$

Da mesma forma, houve decréscimo no comprimento (Figura 2A), área de superfície (Figura 2B) e volume de raiz (Figura 2C) ao aumentar as doses de  $\text{Al}^{3+}$ . Isso ocorreu devido a inibição de seu crescimento e desenvolvimento quando em contato com  $\text{Al}^{3+}$  (KOCHIAN, 1995). Devido ao menor crescimento e desenvolvimento das raízes (2A, B e C), o reflexo desse efeito foi menor produção de massa seca de raiz (Figura 1B).

Houve aumento no diâmetro médio de raiz com aplicação de doses crescentes de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 2D), isso ocorreu porque as raízes sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  se tornam atrofiadas em função da morte ou injúria do meristema radicular e aumento da rigidez de parede celular e sua espessura (MEHARG, 1993; SCHLINDWEIN et al., 2003).

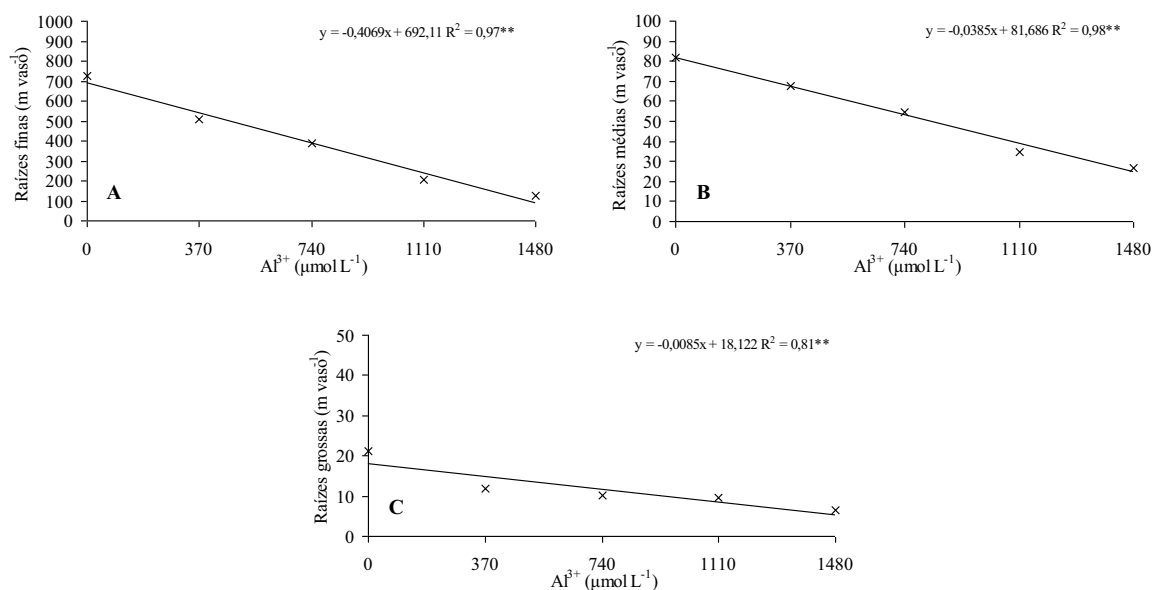


**Figura 2.** Comprimento (A), área de superfície (B), volume (C) e diâmetro médio de raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$

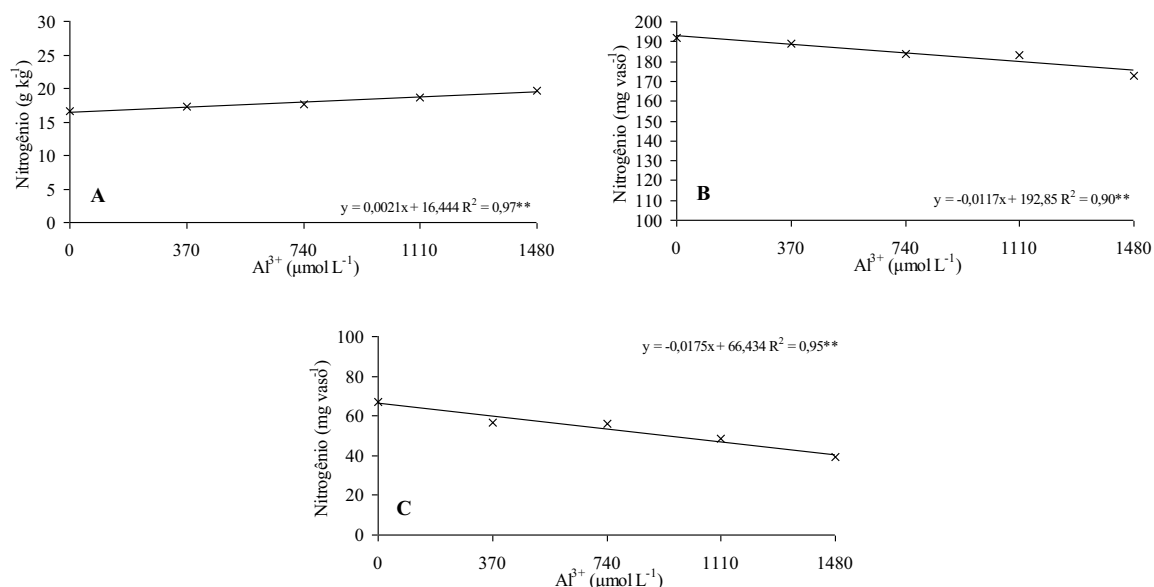
Assim como ocorreu para o comprimento de raiz (Figura 2A), o comprimento de raízes finas (Figura 3A), médias (Figura 3B) e grossas (Figura 3C) decresceram com o aumento das doses de  $\text{Al}^{3+}$ . Houve maior tendência de decréscimo em raízes finas, porque a diferença da dose 0 até a  $1480 \mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  é de aproximadamente 600 m, enquanto em raízes médias o decréscimo é de cerca de 50 m, e em raízes grossas algo em torno de 10m. Isso indica que o  $\text{Al}^{3+}$  pode interferir de forma mais intensa no crescimento de raízes finas, que são as maiores responsáveis pela absorção de água e nutrientes (MISTRO et al., 2001; WANG et al., 2006; ZONTA et al., 2006).

Com relação aos nutrientes, com a aplicação de  $\text{Al}^{3+}$ , houve acréscimo no teor de N nas raízes (Figura 4A). Isso ocorreu devido ao efeito concentração, uma vez que ao elevar as doses de  $\text{Al}^{3+}$  ocorre decréscimo na produção de massa seca de raiz. Isso pode ser confirmado pelo acúmulo de N na raiz (Figura 4C), conforme houve acréscimo nas doses de  $\text{Al}^{3+}$  o acúmulo de N foi menor nas raízes. Houve o mesmo comportamento para acúmulo de N na parte aérea (Figura 4B). Ainda, não houve diferença entre as doses de  $\text{Al}^{3+}$  para teor de N na parte aérea.





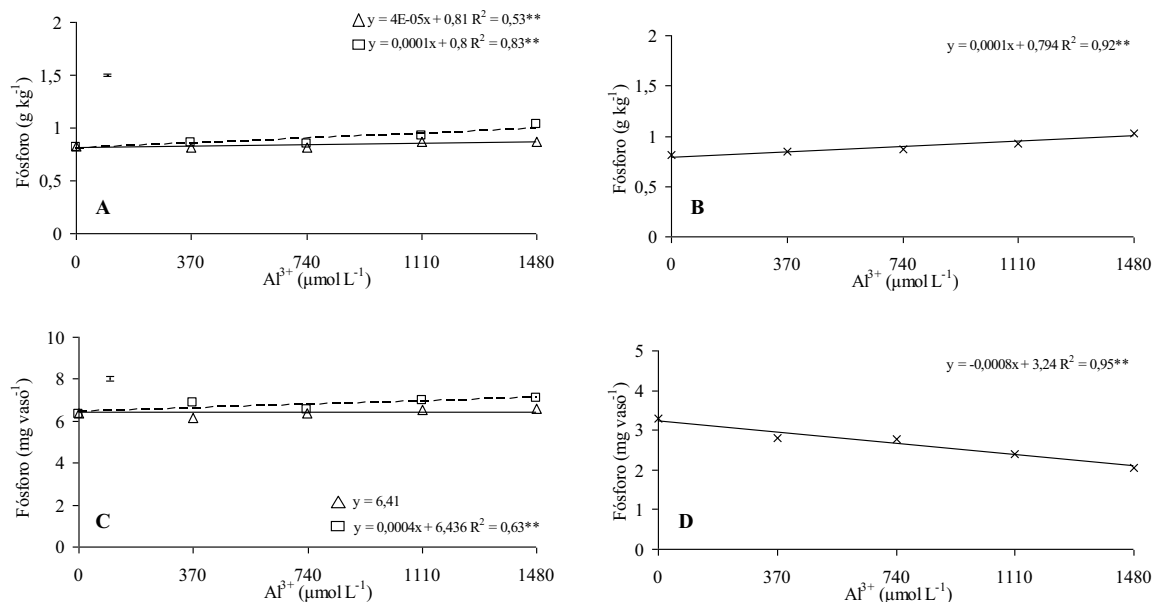
**Figura 3.** Comprimento de raízes finas (A), comprimento de raízes médias (B) e comprimento de raízes grossas (C) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$



**Figura 4.** Teor de nitrogênio na raiz (A) e acúmulo de nitrogênio na parte aérea (B) e raiz (C) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$

Houve acréscimo no teor e acúmulo de P na parte aérea conforme aumentou as doses de  $Al^{3+}$  (Figura 5A), exceto para acúmulo de P na parte aérea na fonte sulfato de alumínio e potássio, que se manteve constante (Figura 5C). Também houve acréscimo no teor de P da raiz de plantas crescidas sob toxidez por cloreto de alumínio (Figura 5B), que pode ter ocorrido pelo efeito concentração, devido ao decréscimo de

produção de massa seca de raiz conforme aumentou as doses de  $Al^{3+}$  (Figura 1B). Por outro lado, o acúmulo de P na raiz decresceu com a aplicação de  $Al^{3+}$  (Figura 5D), confirmando o efeito concentração descrito anteriormente.



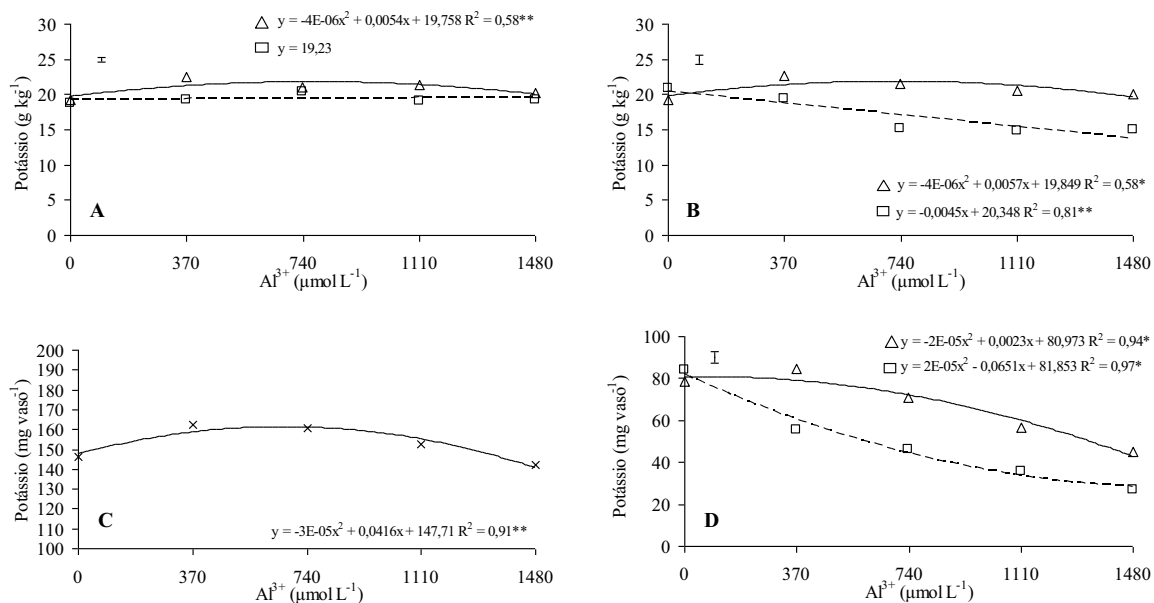
**Figura 5.** Teor de fósforo na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de fósforo na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( $\times$ ). \*\*  $p < 0,01$

Houve aumento inicial no teor e acúmulo de K na parte aérea e posterior decréscimo com o aumento das doses de  $Al^{3+}$  da fonte sulfato de alumínio e potássio (Figura 6A e C). No entanto, o decréscimo não pode ser considerado danoso, já que o teor e acúmulo de K na dose de 1480  $\mu mol L^{-1}$  foi praticamente o mesmo obtido na dose 0 de  $Al^{3+}$ . No entanto, o aumento inicial do teor e acúmulo de K pode ter ocorrido devido ao aumento na disponibilidade de K nas doses de sulfato de alumínio e potássio, este que está presente em sua formulação.

No entanto, o teor de K na parte aérea não foi afetado ao utilizar cloreto de alumínio (Figura 6A). Por outro lado, houve leve acréscimo no acúmulo de K na parte aérea quando foi utilizado cloreto de alumínio até a dose de 740  $\mu mol L^{-1}$ , mas, nas doses mais altas houve decréscimo (Figura 6C). Isso pode confirmar mais uma vez o maior efeito danoso do cloreto de alumínio em comparação ao sulfato de alumínio e potássio.

Na raiz fica claro o efeito danoso do cloreto de alumínio em doses crescentes (Figura 4B e D). Ao utilizar essa fonte de  $Al^{3+}$ , observou-se decréscimo no teor e acúmulo de K. O decréscimo do teor e acúmulo de K na raiz foi mais acentuado para o

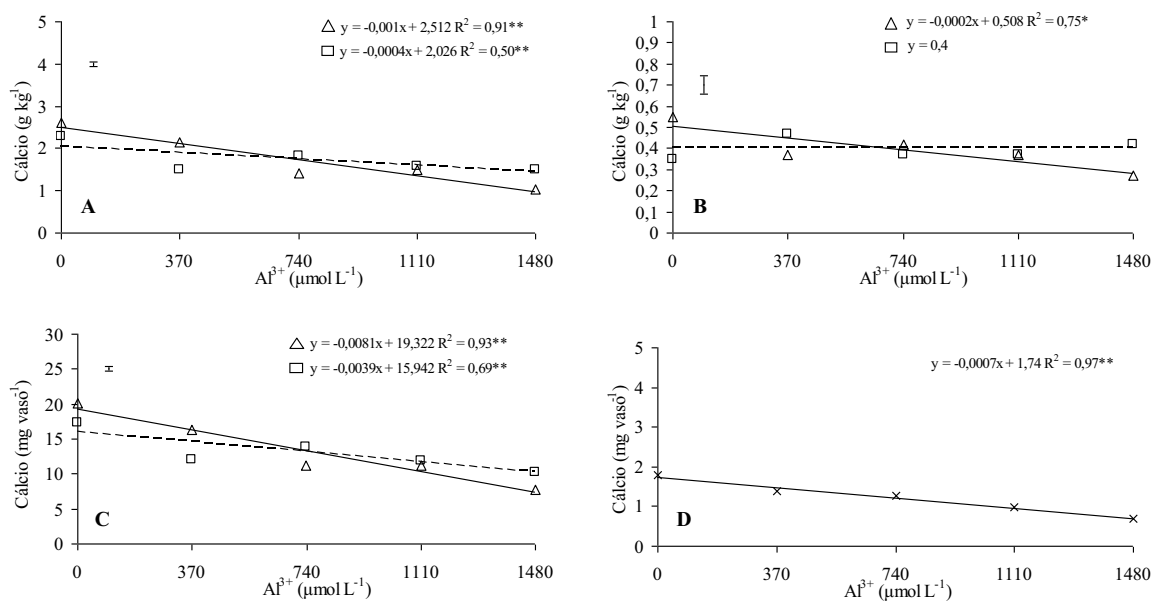
cloreto de alumínio, enquanto no sulfato de alumínio e potássio as raízes foram beneficiadas devido ao K existente na formulação deste reagente.



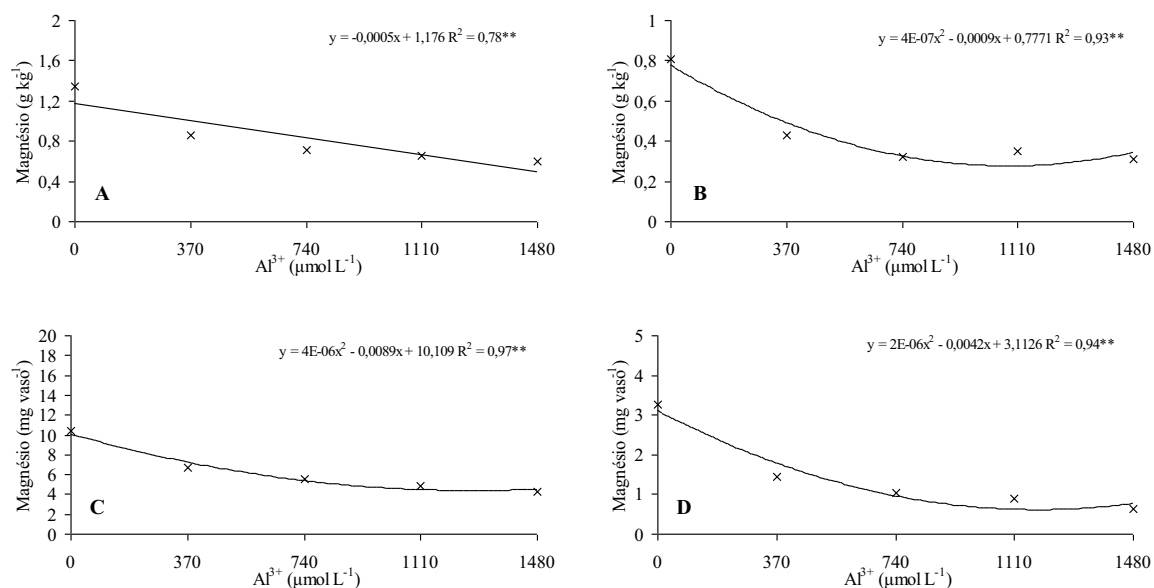
**Figura 6.** Teor de potássio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de potássio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio (  $\Delta$  ), cloreto de alumínio (  $\square$  ) e média das fontes ( X ). \*  $p < 0,05$  e \*\*  $p < 0,01$

O teor e acúmulo de Ca na parte aérea e raiz (Figura 7A, C e D), decresceram com o aumento das doses de  $\text{Al}^{3+}$  aplicadas. Também houve decréscimo no teor e acúmulo de Mg na parte aérea e raiz (Figura 8A, B, C e D). O  $\text{Al}^{3+}$  interfere negativamente nas bases na solução do solo, especialmente Ca e Mg, diminuindo a absorção destas pelas plantas. Freitas et al. (2006) observaram redução na absorção de P, Mg, Ca e K de plantas de arroz sob toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  nas doses de 370, 740 e 1110  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

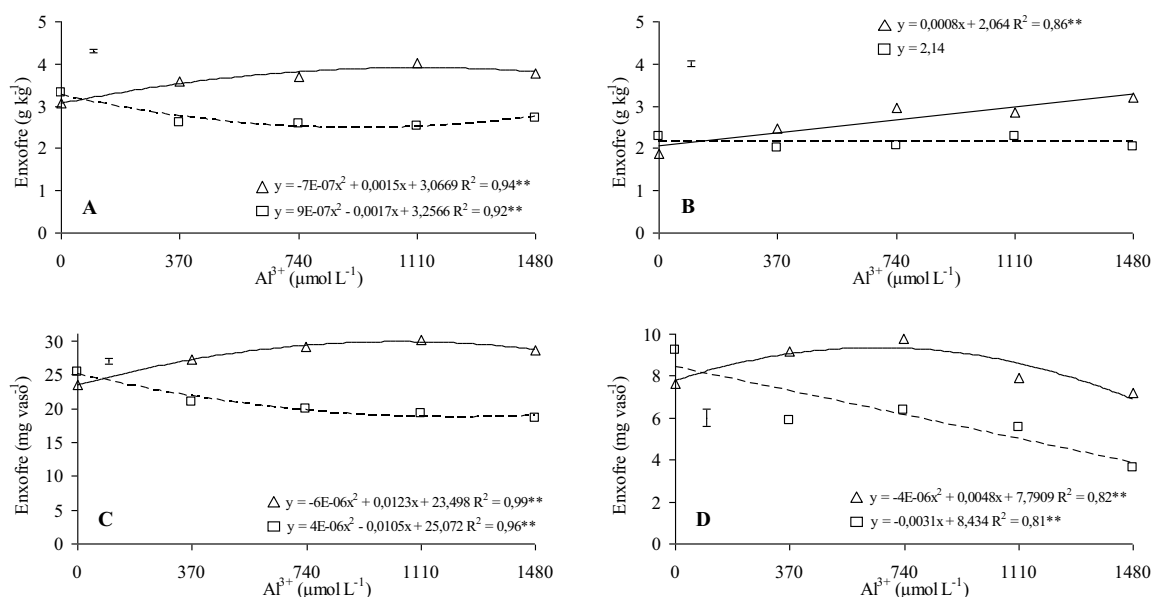
Com o aumento das doses de  $\text{Al}^{3+}$  ao utilizar sulfato de alumínio e potássio houve acréscimo no teor e acúmulo de S na parte aérea e raiz (Figura 9A, B, C e D). Assim como ocorre para o K, há S na formulação do sulfato de alumínio e potássio, dessa forma, ao aumentar as doses deste, espera-se maior disponibilidade de S no sistema, e, maior teor e acúmulo na planta.



**Figura 7.** Teor de cálcio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cálcio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes (X). \*  $p < 0,05$  e \*\*  $p < 0,01$



**Figura 8.** Teor de magnésio na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de magnésio na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes (X). \*\*  $p < 0,01$

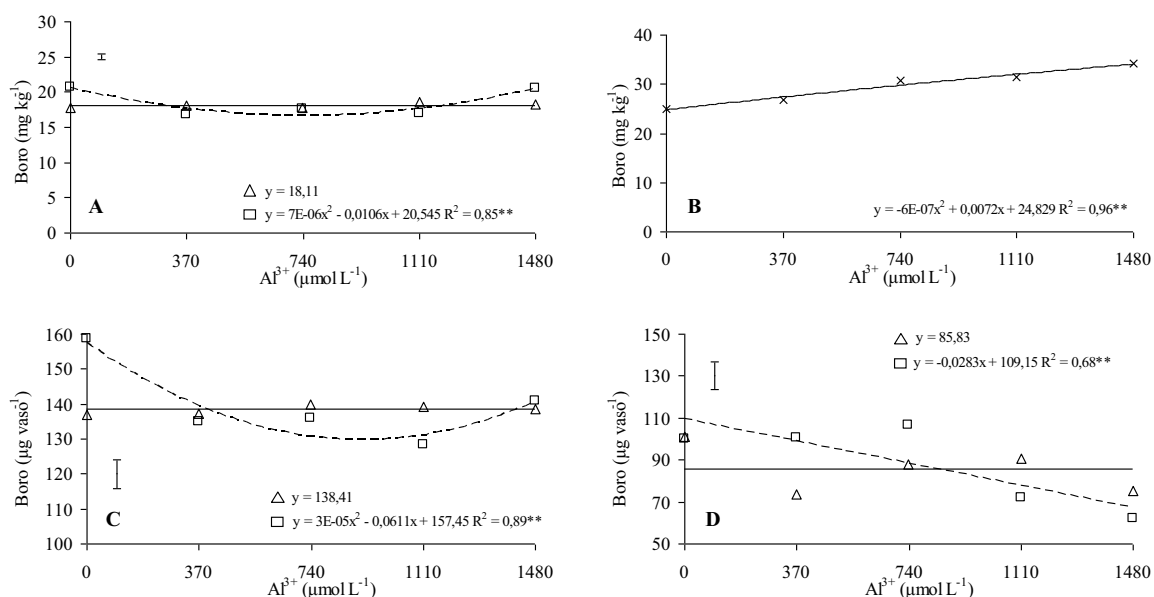


**Figura 9.** Teor de enxofre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de enxofre na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ) e cloreto de alumínio ( $\square$ ). **\*\***  $p < 0,01$

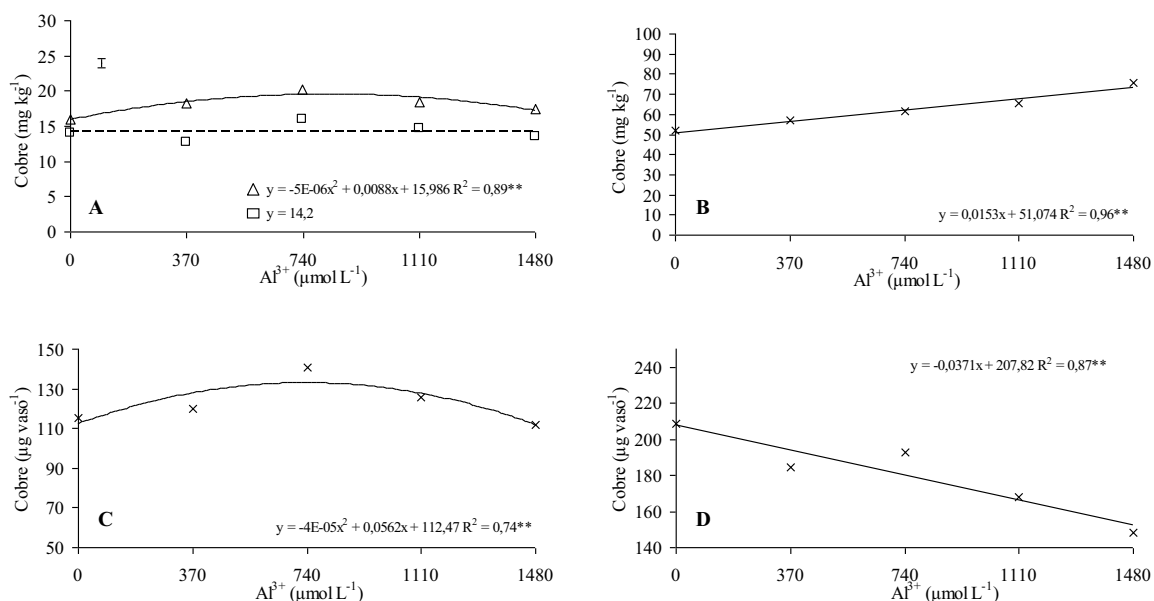
Em compensação, ao utilizar cloreto de alumínio, ocorreu decréscimo no teor e acúmulo de S na parte aérea (Figura 9A e C) e no acúmulo de S na raiz (Figura 9D). Demonstrando assim mais uma característica favorável a utilização do cloreto de alumínio, já que não há fornecimento extra de S.

Ao utilizar cloreto de alumínio houve decréscimo no acúmulo de B da parte aérea (Figura 10C) e raiz (Figura 10D). Por outro lado, o sulfato de alumínio e potássio não interferiu no teor e acúmulo de B na parte aérea de plantas de arroz de terras altas, com exceção do teor de B na raiz, havendo incremento no seu teor ao passo que aumentou-se as doses de Al<sup>3+</sup> (Figura 10B). No entanto, não foi observado tal efeito no acúmulo de B na raiz (Figura 10D).

Para o acúmulo de Cu na parte aérea houve aumento inicial e posterior decréscimo com a aplicação de Al<sup>3+</sup> (Figura 11C), no qual, ao aplicar sulfato de alumínio e potássio, mesmo na maior dose de Al<sup>3+</sup> o acúmulo de Cu não foi menor a dose 0 de Al<sup>3+</sup>. Por outro lado ao usar o cloreto de alumínio, na dose 1480 μmol L<sup>-1</sup> de Al<sup>3+</sup> o acúmulo de Cu é menor em comparação às outras doses.



**Figura 10.** Teor de boro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de boro na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( $\times$ ).  $** p < 0,01$

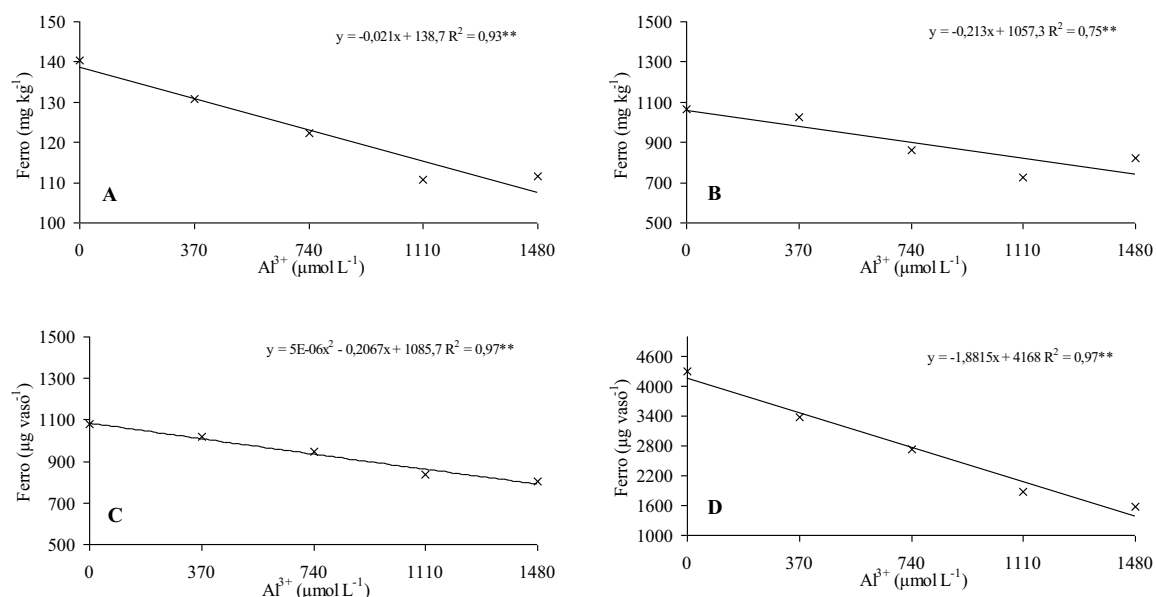


**Figura 11.** Teor de cobre na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de cobre na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, sulfato de alumínio e potássio ( $\Delta$ ), cloreto de alumínio ( $\square$ ) e média das fontes ( $\times$ ).  $* p < 0,05$  e  $** p < 0,01$

Já o teor de Cu na raiz foi crescente com a aplicação de  $Al^{3+}$  (Figura 11B). Isso pode ter ocorrido devido ao efeito concentração, baseando-se nos resultados de produção de massa seca da parte aérea (Figura 1B). No entanto, o acúmulo

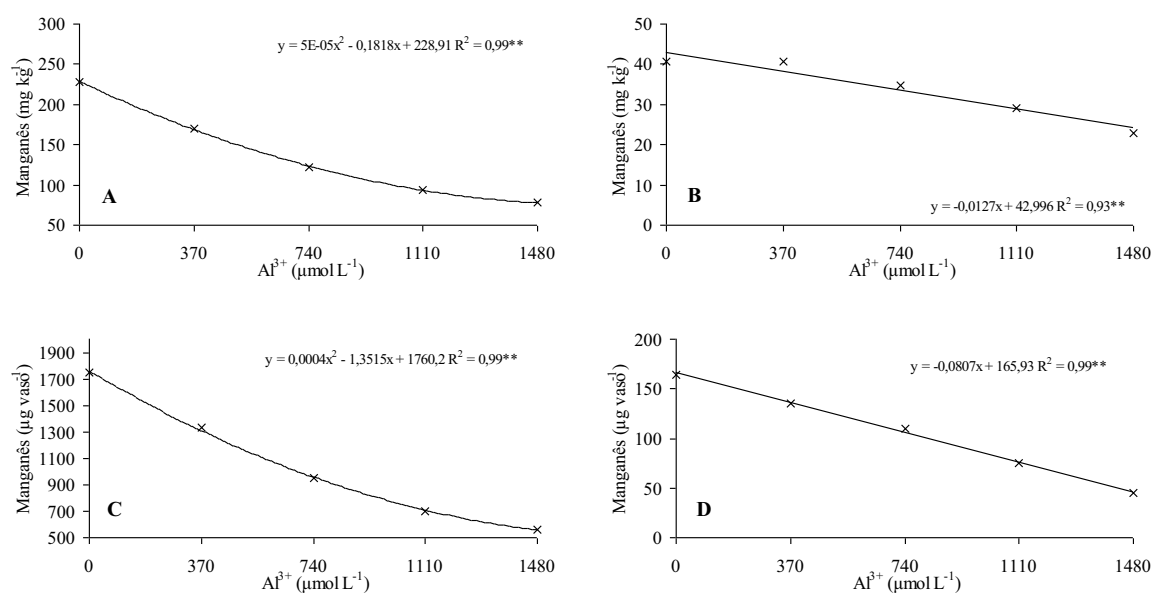
de Cu na raiz foi decrescente em ambas as fontes de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 11D), dessa forma, fica claro a influencia negativa do  $\text{Al}^{3+}$  em doses crescentes sob o acúmulo de Cu nas raízes de plantas de arroz de terras altas.

O teor e acúmulo na parte aérea e raiz de Fe, Mn e Zn (Figura 12, 13 e 14) decresceram conforme as doses de  $\text{Al}^{3+}$  aumentaram, independentemente da fonte utilizada. Assim, fica claro a influencia negativa do  $\text{Al}^{3+}$  na absorção de micronutrientes como, Fe, Mn e Zn. Ao ocorrer o contato das raízes com o  $\text{Al}^{3+}$  há inibição do crescimento destas, conforme já comentado, conseqüentemente, há influencia negativa na absorção de nutrientes em geral (BRONDANI; PAIVA, 1996).

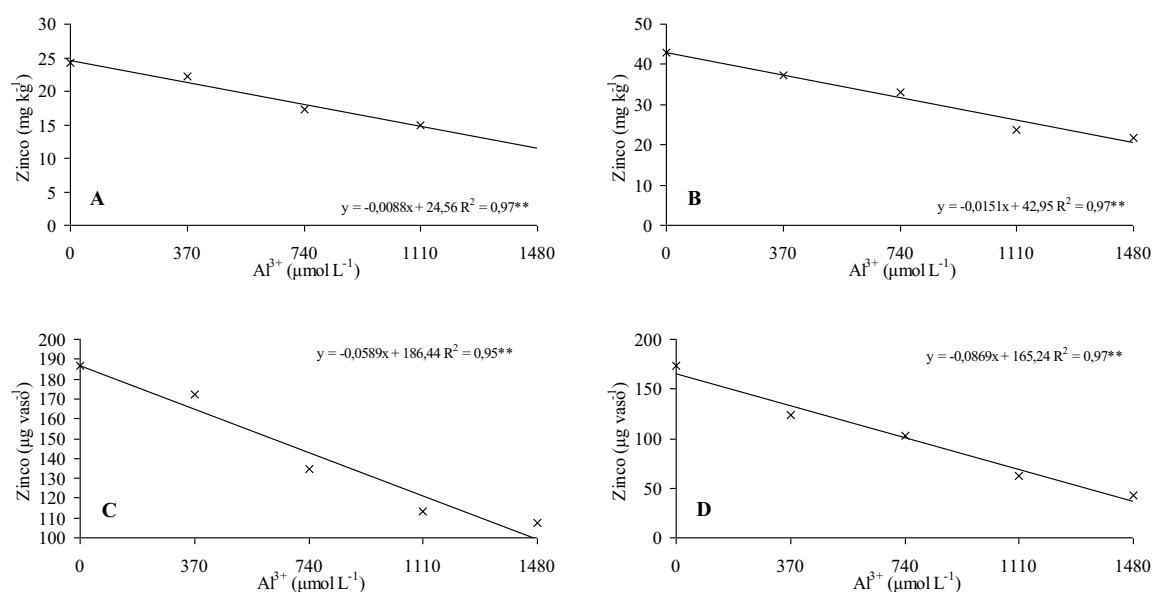


**Figura 12.** Teor de ferro na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de ferro na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$

Diante dos resultados, selecionou o cloreto de alumínio para ser utilizado nos experimentos 2, 3, 4 e 5. Ainda, selecionou a dose de  $1480 \mu\text{mol L}^{-1}$  para os experimentos 2 e 4. Essa dose foi selecionada porque foi capaz de gerar toxidez considerável em cultivar suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  (Cultivar Maravilha), e no experimento 2 foi realizado teste de cultivar, dessa forma imagina-se que para possíveis cultivares tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$  que foram testados no experimento 2, doses menores não fossem tão prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento da planta.



**Figura 13.** Teor de manganês na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de manganês na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$



**Figura 14.** Teor de zinco na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de zinco na parte aérea (C) e raiz (D) de plantas de arroz de terras altas em função da aplicação de doses e fontes de alumínio, média das fontes ( X ). \*\*  $p < 0,01$

### 6.1.1. Considerações finais

O cloreto de alumínio gerou maior toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  às plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva em comparação ao sulfato de alumínio e potássio.



Ao utilizar cloreto de alumínio, as plantas apresentaram menor produção de matéria seca total e de raiz; área de superfície e volume radicular; comprimento de raízes médias e grossas; teor e acúmulo de nutrientes em geral, especialmente K e S, estes que não estão presentes na formulação do reagente.

Ao utilizar cloreto de alumínio houve maior atividade e disponibilidade de  $Al^{3+}$  (forma tóxica às plantas) na solução nutritiva em comparação ao sulfato de alumínio e potássio.

De maneira geral a dose de  $1480 \mu mol L^{-1}$  de  $Al^{3+}$  pode gerar maior toxidez por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva.

Com o aumento das doses de  $Al^{3+}$  houve menor produção de matéria seca total e raiz; altura de plantas; produção de perfilhos por planta; comprimento, área de superfície e volume de raiz; maior diâmetro médio de raiz; menor comprimento de raízes finas, médias e grossas; menor acúmulo de nutrientes em geral, no entanto, menor acúmulo de K e S na parte aérea e raiz somente para o cloreto de alumínio.

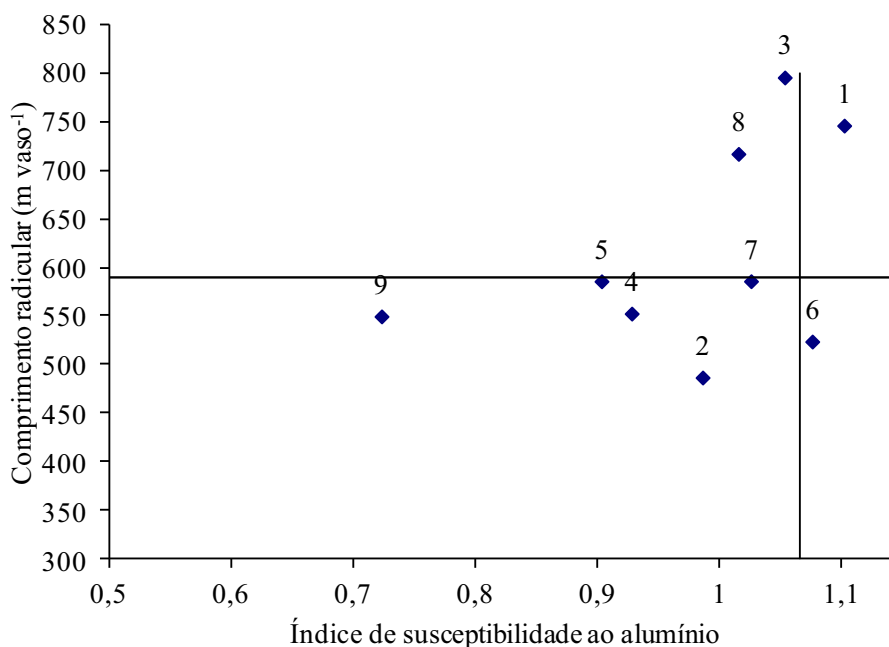
## **6.2. Experimento 2: avaliação de cultivares de arroz de terras altas quanto a tolerância ao alumínio**

Com base na distribuição dos cultivares em quartis (Figura 15), estes dividiram-se em dois grupos, sendo o primeiro composto por BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja, IAC 202, AN Cambará e ANa 7007 cujo o índice de susceptibilidade do crescimento radicular ao  $Al^{3+}$  foi menor que 1,06, estes cultivares obtiveram índice menor que a média do seu índice de susceptibilidade à toxicidade de alumínio, diminuído de 25% do seu desvio padrão, sendo assim, considerados tolerante ao  $Al^{3+}$ .

O segundo grupo foi composto pelos cultivares BRS Monarca e Maravilha, que obtiveram índice de susceptibilidade do crescimento radicular ao  $Al^{3+}$  maior que 1,06, sendo assim, considerados sensíveis a presença do  $Al^{3+}$ . Destaca-se o cultivar BRS Monarca por seu bom crescimento radicular quando crescido na ausência de  $Al^{3+}$ . Vale lembrar que quanto menor o valor do índice de susceptibilidade ao alumínio, o cultivar é menos afetado pela ação do  $Al^{3+}$ .

Foi utilizada a distribuição dos cultivares em quartis (crescimento radicular) visando separá-los em grupos quanto sua tolerância ao  $Al^{3+}$ , no entanto, a partir desse ponto os cultivares foram tratados de forma isolada, visando avaliar não só a

eficiência dos cultivares sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$ , mas também compará-los sem  $\text{Al}^{3+}$ , já que foram cultivados a pH 4,0, faixa esta dentro da faixa de pH que a cultura do arroz de terras altas é cultivada, especialmente em aberturas de área.



**Figura 15.** Distribuição dos cultivares em quartis delimitados pelo comprimento radicular em  $0 \mu\text{mol L}^{-1}$  de alumínio e pelo índice de susceptibilidade do crescimento radicular à toxicidade do alumínio, nos pontos determinados pela média de comprimento radicular (sem  $\text{Al}^{3+}$ ) + 75% do seu desvio padrão e pela média de índice de susceptibilidade radicular ao alumínio - 25% do seu desvio padrão. Legenda de cultivares: 1-BRS Monarca, 2-BRS Pepita, 3-BRS Bonança, 4-BRS Primavera, 5-BRS Sertaneja, 6-Maravilha; 7-IAC 202; 8-AN Cambará e 9-ANa 7007

Ainda, é importante citar que o índice utilizado para separação em quartis, é praticamente a diferença entre o valor de comprimento radicular cultivado sem e com  $\text{Al}^{3+}$ , dessa forma, pode haver diferenças entre os grupos obtidos de acordo com esse método e as análises de forma isolada.

Avaliando isoladamente a altura de plantas (Tabela 14), observou-se que os cultivares BRS Monarca, BRS Sertaneja e AN Cambará obtiveram melhores resultados, quando cultivados sem  $\text{Al}^{3+}$ . Por outro lado, quando cultivados com  $\text{Al}^{3+}$  somente o cultivar BRS Sertaneja foi capaz de manter o bom desempenho, além do mais, foi o único a não ser diferente quando cultivado sem e com  $\text{Al}^{3+}$ .

Quanto ao número de perfilhos por planta (Tabela 14), os cultivares BRS Monarca, Maravilha, IAC 202 e AN Cambará obtiveram melhor desempenho quando cultivados sem  $\text{Al}^{3+}$ , enquanto BRS Pepita apresentou menor perfilhamento. Quando

cultivados sob estresse por  $Al^{3+}$ , os cultivares BRS Bonança, Primavera e Sertaneja e AN Cambará foram capazes de manter o mesmo perfilhamento comparando a quando cultivados sem estresse por  $Al^{3+}$ .

**Tabela 14.** Média de altura de plantas e número de perfilhos por planta de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Altura de plantas		Número de perfilhos por planta	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	cm		-	
BRS Monarca	60,5aA	55,6bB	4,1aA	3,6aB
BRS Pepita	57,8bA	53,0cB	3,1cA	2,6bB
BRS Bonança	53,2cA	49,8cB	3,7bA	3,4aA
BRS Primavera	58,8bA	56,2bB	3,7bA	3,3aA
BRS Sertaneja	60,7aA	58,8aA	3,7bA	3,3aA
Maravilha	55,5cA	51,5cB	4,0aA	3,1bB
IAC 202	54,3cA	51,5cB	4,2aA	3,8aB
AN Cambará	60,4aA	54,9bB	3,9aA	3,7aA
ANa 7007	57,9bA	51,2cB	3,6bA	2,8bB
CV(%)	3,0		7,8	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

O cultivar BRS Monarca obteve maior produção de massa seca de parte aérea e raiz (Tabela 15) e por consequência total (Tabela 16), quando cultivado sem  $Al^{3+}$ . Por outro lado, ao comparar a produção de massa seca da parte aérea dos cultivos com e sem  $Al^{3+}$ , os cultivares BRS Monarca, Maravilha e ANa 7007 foram menores na presença de  $Al^{3+}$  (Tabela 15). Mesmo assim, o cultivar BRS Monarca obteve a maior produção de massa seca da parte aérea quando cultivado sob  $Al^{3+}$  em comparação aos outros cultivares. Os cultivares BRS Pepita, Maravilha e ANa 7007 obtiveram menor produção de massa seca da parte aérea quando cultivados tanto com  $Al^{3+}$ , quanto sem.

Ao avaliar a produção de massa seca radicular (Tabela 15), observou-se que o cultivar BRS Monarca obteve maior produção quando cultivado sem e com  $Al^{3+}$ . Ainda, não houve diferença ao comparar os cultivos sem e com  $Al^{3+}$  para o referido cultivar.

Os cultivares BRS Pepita, Maravilha e ANa 7007 obtiveram menor produção de massa seca de raiz quando cultivados com e sem  $Al^{3+}$ . No entanto, dos três cultivares apenas BRS Pepita, não foi diferente ao comparar o cultivo com e sem  $Al^{3+}$ , os outros dois sendo afetados negativamente pela presença de  $Al^{3+}$ .

**Tabela 15.** Média de massa seca da parte aérea e radicular de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Massa seca parte aérea		Massa seca radicular	
	S/Al <sup>3+</sup>	C/Al <sup>3+</sup>	S/Al <sup>3+</sup>	C/Al <sup>3+</sup>
	-----g vaso <sup>-1</sup> -----			
BRS Monarca	8,1aA	7,1aB	2,3aA	2,1aA
BRS Pepita	4,1cA	3,8bA	1,2cA	1,0cA
BRS Bonança	6,5bA	6,0aA	2,0bA	1,7bB
BRS Primavera	6,7bA	6,2aA	1,9bA	1,6bB
BRS Sertaneja	6,6bA	5,9aA	1,9bA	1,4bB
Maravilha	5,0cA	4,1bB	1,5cA	1,0cB
IAC 202	6,3bA	6,1aA	1,7bA	1,7bA
AN Cambará	6,4bA	5,8aA	1,9bA	1,6bB
ANa 7007	4,6cA	3,5bB	1,2cA	0,6dB
CV(%)	9,0		9,7	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

**Tabela 16.** Média de comprimento radicular e área de superfície de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Massa seca total		Relação raiz/parte aérea	
	S/Al <sup>3+</sup>	C/Al <sup>3+</sup>	S/Al <sup>3+</sup>	C/Al <sup>3+</sup>
	g vaso <sup>-1</sup>		-	
BRS Monarca	10,5aA	9,3aB	0,28bA	0,30aA
BRS Pepita	5,4cA	4,8cA	0,30aA	0,27aB
BRS Bonança	8,6bA	7,7bA	0,31aA	0,28aB
BRS Primavera	8,6bA	7,8bA	0,28bA	0,27bA
BRS Sertaneja	8,6bA	7,3bB	0,30aA	0,24bB
Maravilha	6,5cA	5,1cB	0,30aA	0,26bB
IAC 202	8,1bA	7,8bA	0,28bA	0,28aA
AN Cambará	8,3bA	7,5bA	0,30aA	0,27aA
ANa 7007	5,9cA	4,2cB	0,27bA	0,18cB
CV(%)	8,8		6,4	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Em linha geral, a produção de massa seca total (Tabela 16) segue os resultados observados para massa seca da parte aérea e radicular isoladamente (Tabela 15). O cultivar BRS Monarca apresentou maior produção cultivado com e sem Al<sup>3+</sup>. No entanto, houve diferença entre os cultivos com e sem Al<sup>3+</sup> para esse cultivar. Ainda, os cultivares BRS Pepita, Maravilha e ANa 7007 apresentaram a menor produção de massa seca total, assim como anteriormente observado.

A produção de massa seca de parte aérea e raiz (Tabela 15) e comprimento radicular (Tabela 16) do cultivar Maravilha quando cultivado com Al<sup>3+</sup>, pode

contribuir para comprovar sua suscetibilidade ao  $Al^{3+}$  observada via quartis (Figura 15). Ainda, os resultados obtidos para o cultivar Maravilha corroboram com Mendonça et al. (2003), Justino et al. (2006) e Ribeiro (2011), que também observaram suscetibilidade do cultivar Maravilha ao  $Al^{3+}$ .

A relação raiz e parte aérea demonstra a eficiência de determinado cultivar na produção de massa seca de parte aérea de acordo com a produção de massa seca radicular. Sendo assim, quanto menor seu valor, maior sua eficiência, destaca-se o cultivar ANa 7007 (Tabela 16), no qual, este foi capaz de produzir boa massa seca de parte aérea mesmo com a baixa produção de massa seca radicular, resultado obtido tanto no crescimento sem  $Al^{3+}$  quanto com  $Al^{3+}$ .

Quanto ao crescimento radicular, os cultivares BRS Monarca e Bonança e AN Cambará apresentam maior comprimento radicular quando crescidos sem  $Al^{3+}$  (Tabela 17). Assim, pode-se explicar o porque do cultivar BRS Mornarca ter sido classificado como suscetível ao  $Al^{3+}$  nos grupos obtidos no quartis (Figura 15), por que este cultivar apresentou grande amplitude entre o crescimento radicular com e sem  $Al^{3+}$ , ficando evidente a ação danosa do  $Al^{3+}$ .

**Tabela 17.** Média de comprimento radicular e área de superfície de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Comprimento de raiz		Área de superfície	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	m vaso <sup>-1</sup>		cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	
BRS Monarca	745,8aA	227,9bB	462,8aA	235,3aB
BRS Pepita	487,0bA	206,6bB	292,6cA	175,9aB
BRS Bonança	795,2aA	233,2bB	448,0aA	164,8aB
BRS Primavera	552,7bA	229,6bB	336,1bA	175,5aB
BRS Sertaneja	585,9bA	229,0bB	363,6bA	197,9aB
Maravilha	524,0bA	168,4bB	368,2bA	168,2aB
IAC 202	586,0bA	208,5bB	414,2aA	236,9aB
AN Cambará	716,7aA	254,2bB	369,7bA	177,2aB
ANa 7007	549,8bA	331,8aB	275,5cA	56,3bB
CV(%)	12,4		17,2	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Por outro lado, ao avaliar o cultivar ANa 7007 na presença de  $Al^{3+}$ , observou-se que apesar deste apresentar menor produção de massa seca da parte aérea, radicular (Tabela 15) e total (Tabela 16), este, apresenta o mais alto comprimento radicular

entre todos os cultivares quando sob estresse por  $Al^{3+}$  (Tabela 17). O baixo diâmetro radicular mesmo em condições de estresse por  $Al^{3+}$  (Tabela 18), pode ser responsável pela baixa massa seca radicular observada do cultivar ANa 7007 (Tabela 15), no entanto o cultivar tem alto crescimento radicular (Tabela 17), sendo esta a principal característica que fez com que fosse selecionado como tolerante ao  $Al^{3+}$ , podendo assim ser mais eficiente na absorção de água e nutrientes. Por outro lado, o cultivar ANa 7007 obteve baixa área de superfície (Tabela 17), devido seu baixo diâmetro radicular (Tabela 18), por consequência, baixa produção de massa seca (Tabela 15) e volume radicular (Tabela 18).

**Tabela 18.** Média de volume e diâmetro radicular de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Volume		Diâmetro médio	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	cm <sup>3</sup> vaso <sup>-1</sup>		mm	
BRS Monarca	2,2aA	1,8aB	0,19aA	0,30aB
BRS Pepita	1,3bA	1,0bA	0,17bA	0,24cB
BRS Bonança	2,0aA	1,0bB	0,17bA	0,25cB
BRS Primavera	1,7aA	1,1bB	0,20aA	0,25cB
BRS Sertaneja	1,9aA	1,3bB	0,20aA	0,26cB
Maravilha	1,9aA	1,1bB	0,19aA	0,27bB
IAC 202	2,1aA	1,7aA	0,20aA	0,30aB
AN Cambará	1,7aA	1,0bB	0,17bA	0,24cB
ANa 7007	1,1bA	0,2cB	0,17bA	0,16dA
CV(%)	21,1		6,6	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Os cultivares BRS Monarca, BRS Bonança e IAC 202 apresentaram maior área de superfície quando cultivados sem  $Al^{3+}$  (Tabela 17). Ao comparar a área de superfície dos cultivares nos cultivos sem e com  $Al^{3+}$  observou-se menor eficiência de todos os cultivares quando cultivados com  $Al^{3+}$ , acompanhando o resultado de comprimento radicular.

O diâmetro radicular referente ao cultivo sem  $Al^{3+}$  pode ser considerado padrão para comparação (Tabela 18). Sendo assim, ao comparar os cultivares sob cultivo com e sem  $Al^{3+}$ , observou-se o efeito do espessamento radicular causado pela toxidez, este que ocorreu para praticamente todos os cultivares, com exceção do ANa 7007.

Destaca-se o cultivar BRS Monarca, o qual houve um aumento de 107 mm no diâmetro radicular médio comparando o cultivo com e sem  $Al^{3+}$ , sendo o maior

observado entre os nove cultivares estudados (Tabela 18). Dessa forma, essa variável pode dar suporte na seleção do referido cultivar como suscetível ao  $Al^{3+}$ .

O cultivar ANa 7007 obteve o menor diâmetro médio radicular quando cultivado sob estresse por  $Al^{3+}$ , o que sugere que o  $Al^{3+}$  não aumentou a espessura de raiz do cultivar em comparação ao cultivo sem  $Al^{3+}$ , já que nos cultivos sem e com  $Al^{3+}$  não houve diferença para a variável em questão do referido cultivar.

Os cultivares ANa 7007, BRS Pepita, Primavera e AN Cambará apresentaram menores teores de  $Al^{3+}$  na parte aérea (Tabela 19). Destaca-se o cultivar ANa 7007, que obteve menor teor de  $Al^{3+}$  na parte aérea. Por outro lado o cultivar Maravilha obteve maior teor de  $Al^{3+}$  na parte aérea, confirmando sua suscetibilidade ao  $Al^{3+}$ , apesar do seu baixo acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea (Tabela 19), o que pode ser explicado por sua baixa produção de massa seca da parte aérea (Tabela 15).

**Tabela 19.** Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Teor		Acúmulo	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	g kg <sup>-1</sup>		mg vaso <sup>-1</sup>	
BRS Monarca	0,02aB	0,21bA	0,2aB	1,5aA
BRS Pepita	0,01aB	0,18cA	0,06aB	0,7dA
BRS Bonança	0,02aB	0,24aA	0,1aB	1,4aA
BRS Primavera	0,01aB	0,19cA	0,09aB	1,1bA
BRS Sertaneja	0,009aB	0,20bA	0,06aB	1,2bA
Maravilha	0,007aB	0,24aA	0,03aB	1,0cA
IAC 202	0,01aB	0,20bA	0,1aB	1,2bA
AN Cambará	0,01aB	0,19cA	0,1aB	1,1bA
ANa 7007	0,02aB	0,18cA	0,1aB	0,6dA
CV(%)	8,3		16,3	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Os cultivares ANa 7007 e BRS Pepita apresentaram menor acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea (Tabela 19). Esse resultado pode ter ocorrido devido a menor produção de massa seca da parte aérea (Tabela 15), no entanto, reforça-se a tolerância do cultivar ANa 7007 ao  $Al^{3+}$ .

O cultivar Maravilha obteve baixo teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz (Tabela 20), dessa forma, fica evidente sua não eficiência em manter o  $Al^{3+}$  inativado nas raízes, sendo translocado mais intensamente para a parte aérea. Ainda, os cultivares BRS

Monarca, Pepita, AN Cambará e ANa 7007 obtiveram menor teor de  $Al^{3+}$  na raiz em comparação aos outros cultivares.

O cultivar ANa 7007 obteve menor acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz entre todos os cultivares testados, resultado este que pode ser explicado, devido sua baixa produção de massa seca de raiz e baixo teor de  $Al^{3+}$  na raiz.

Ainda, o cultivar BRS Monarca, Bonança e Primavera obtiveram os maiores valores de acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz. Destaca-se o cultivar BRS Monarca, este que obteve o maior acúmulo de  $Al^{3+}$  nas raízes entre os cultivares testados, e ainda, é considerado suscetível ao  $Al^{3+}$  pelo método de separação em grupos por quartis (Figura 15). É possível inferir que houve decréscimo do crescimento radicular do cultivar BRS Monarca quando cultivado na presença de  $Al^{3+}$  (Tabela 17), devido ao alto acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz (Tabela 20).

**Tabela 20.** Média do teor e acúmulo de alumínio na raiz de cultivares de arroz de terras altas cultivados com e sem alumínio

Cultivares	Teor		Acúmulo	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	g kg <sup>-1</sup>		mg vaso <sup>-1</sup>	
BRS Monarca	0,06aB	2,8cA	0,1aB	6,2aA
BRS Pepita	0,06aB	2,5dA	0,08aB	2,7dA
BRS Bonança	0,09aB	3,3aA	0,1aB	5,8aA
BRS Primavera	0,1aB	3,5aA	0,2aB	5,9aA
BRS Sertaneja	0,06aB	3,4aA	0,1aB	5,1bA
Maravilha	0,1aB	2,3dA	0,1aB	2,5dA
IAC 202	0,07aB	3,0bA	0,1aB	5,3bA
AN Cambará	0,09aB	2,8cA	0,1aB	4,6cA
ANa 7007	0,1aB	2,7cA	0,1aB	1,7eA
CV(%)	9,3		17,9	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Diante dos resultados expostos, de forma geral os cultivares BRS Monarca, Bonança, Primavera, Sertaneja, IAC 202 e AN Cambará obtiveram bom crescimento sem a presença de  $Al^{3+}$  e a pH ácido (4,0). Enquanto os cultivares BRS Pepita, Maravilha e ANa 7007 obtiveram menor crescimento quando cultivados sob  $Al^{3+}$ . Vale considerar, que isso não quer dizer que os três últimos cultivares citados não são eficientes e/ou produtivos, assim como os primeiros.

Mesmo na presença de  $Al^{3+}$  o cultivar BRS Monarca apresentou boa produção de massa seca (Tabela 15), portanto, sugere-se estudar metodologias de



seleção de cultivares, visando aumentar a eficiência do teste, porque por um lado o cultivar em questão apresentou ótimo crescimento quanto a produção de massa seca, por outro lado, o cultivar obteve baixo crescimento radicular em comprimento, sendo fortemente afetado pela presença de  $Al^{3+}$ , o que levou a ser considerado suscetível ao  $Al^{3+}$  pela divisão dos cultivares em quartis (Figura 15).

Ressalta-se, que apesar de a produção de massa seca radicular ser uma das variáveis mais utilizadas para diferenciação de cultivares quanto a tolerância ao  $Al^{3+}$  (MA et al., 2004; DONCHEVA et al., 2005), deve-se tomar algumas precauções quanto a diferenciação de cultivares utilizando somente essa variável, devido ao fato de que nem sempre uma planta capaz de produzir alta quantidade de massa seca, seja ela de raiz ou parte aérea, eficiente em converter massa seca produzida em grãos, este que é o objetivo do produtor rural.

De forma contrária, o cultivar ANa 7007 se destacou como tolerante ao  $Al^{3+}$ , mas por sua vez, devido ao alto crescimento radicular obtido sob estresse por  $Al^{3+}$  (Tabela 17), no entanto, obteve a menor produção de massa seca de parte aérea, radicular (Tabela 15) e total (Tabela 16) entre os cultivares avaliados, reforçando a hipótese de que a avaliação dos cultivares deve ser ajustada e avaliado o que contribui de forma mais eficaz para a produção de grãos, massa seca ou crescimento radicular em comprimento.

Portanto, os cultivares selecionados para utilização no experimento 4, foram ANa 7007 (tolerante ao  $Al^{3+}$ ) e Maravilha (susceptível ao  $Al^{3+}$ ). É importante citar que também foi levado em consideração, escolha de dois cultivares com crescimento radicular semelhantes, ao serem cultivados na ausência do  $Al^{3+}$  (Figura 15), visando manter padrão de crescimento radicular.

Para reforçar os resultados do presente experimento, foi conduzido outro experimento com os mesmos cultivares, em vasos com solo alumínico. Na Tabela 21 são apresentados os resultados de panículas por planta, produção de massa seca da parte aérea, produção de grãos e índice de colheita dos cultivares estudados.

Os cultivares BRS Primavera e ANa 7007 apresentaram maior produção de grãos em comparação aos outros cultivares quando cultivados em solo com alto teor de  $Al^{3+}$  (Tabela 21). Ainda, os cultivares ANa 7007 e BRS Primavera apresentaram baixa produção de massa seca da parte aérea, demonstrando assim bom índice de colheita, com especial destaque para o ANa 7007.

**Tabela 21.** Média de panículas por vaso, produção de grãos, massa seca da parte aérea e índice de colheita de cultivares de arroz de terras altas cultivados em solo aluminico

Cultivares	Panículas por planta	Produção de grãos	Massa seca da parte aérea	Índice de colheita
	-	-----g vaso <sup>-1</sup> -----	-	-
BRS Monarca	16,5c	50,0b	48,0c	0,51c
BRS Pepita	18,5b	50,0b	45,7c	0,52c
BRS Bonança	14,7c	42,2c	46,2c	0,47d
BRS Primavera	15,2c	62,0a	51,0b	0,55b
BRS Sertaneja	18,7b	48,5b	58,2a	0,45d
Maravilha	15,5c	47,0c	60,2a	0,44d
IAC 202	16,2c	53,2b	51,2b	0,51c
AN Cambará	14,5c	46,7c	53,2b	0,46d
ANa 7007	32,0a	59,5a	39,2d	0,60a
CV(%)	8,2	5,61	8,5	4,8

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de probabilidade

Esses resultados reforçam a definição do cultivar ANa 7007 como tolerante ao  $Al^{3+}$ , este que apresentou características agronômicas interessantes para alta produtividade, como maior crescimento radicular (Tabela 17) e alto índice de colheita nessas condições (Tabela 21).

Quanto ao cultivar Maravilha, selecionado como suscetível ao  $Al^{3+}$  com base no experimento em solução nutritiva (Figura 15), apesar de obter a maior produção de massa seca da parte aérea entre os cultivares estudados (Tabela 21), obteve baixa produção de grãos, por consequência, obteve pior índice de colheita entre os cultivares. Esses resultados reforçam a definição do presente cultivar como suscetível ao  $Al^{3+}$ .

Dessa forma, esses resultados demonstram que a produção de massa seca da parte aérea pode não ser eficiente na seleção dos cultivares, pelo fato de que o cultivar BRS Sertaneja obteve maior produção de massa seca da parte aérea, no entanto, sua produção de grãos foi menor de que cultivares que produziram menos massa seca da parte aérea (Tabela 21). Ainda, é interessante notar que o cultivar BRS Primavera apresentou alta produção de massa seca da parte aérea e de grãos, ou seja, comportamento contrário ao observado para o cultivar BRS Sertaneja. Em contrapartida, o cultivar ANa 7007 produziu menor quantidade de massa seca de parte aérea e maior produção de grãos.

Sabe-se que o comportamento dos nutrientes em sistema de solução nutritiva é diferente do solo, no entanto, a solução nutritiva é a maneira mais rápida para realizar teste de cultivar, podendo demonstrar resultados de forma eficiente, porém não

pode substituir o solo, por esse motivo foi realizado o experimento complementar em solo (Tabela 21).

Portanto, vale a reflexão de até que ponto a avaliação de determinado cultivar utilizando variáveis de crescimento é válida, partindo do pressuposto de que o objetivo do agricultor é a obtenção de alta produtividade de grãos. Dessa forma, experimentos como este são importantes inicialmente, uma vez que são experimentos de base, ou seja, é o primeiro estudo a ser feito visando obter características dos cultivares quando cultivados sob estresse por  $Al^{3+}$ . Além do que, é possível economizar dinheiro e tempo na sua condução, ao comparar com experimento de campo. No entanto, é de suma importância testar os cultivares estudados no presente trabalho em experimentos de campo, em diferentes regiões, porque só assim será possível diferenciar definitivamente os cultivares quanto sua tolerância ao  $Al^{3+}$ .

Por outro lado, como demonstrado no presente trabalho, deve ser melhor definido para experimentos de base qual variável é mais representativa para visualização de danos causados por  $Al^{3+}$  em plantas, já que como discutido, alguns cultivares tem baixa produção de massa seca, no entanto bom crescimento radicular sob estresse por  $Al^{3+}$ , enquanto outros cultivares tem alta produção de massa seca e baixo crescimento radicular. Assim, são necessários novos estudos visando o melhor entendimento desses pontos.

### **6.2.1. Considerações finais**

Os cultivares foram divididos em dois grupos com base na distribuição dos quartis, sendo eles: grupo tolerante ao  $Al^{3+}$  - BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja, IAC 202, AN Cambará e ANa 7007; grupo suscetível ao  $Al^{3+}$  - BRS Monarca e Maravilha. Portanto, os cultivares selecionados para utilização no experimento 4 foram o ANa 7007 (tolerante ao  $Al^{3+}$ ) e Maravilha (suscetível ao  $Al^{3+}$ )

Analisando os resultados de cultivos de forma isolada, observou-se que os cultivares BRS Monarca, Bonança, Primavera, Sertaneja, IAC 202 e AN Cambará obtiveram bom crescimento na ausência de  $Al^{3+}$  e em pH ácido (4,0). Enquanto que os cultivares BRS Pepita, Maravilha e ANa 7007 obtiveram menor crescimento quando cultivados sob  $Al^{3+}$ .

O cultivar BRS Monarca apesar de ser selecionado suscetível ao  $Al^{3+}$  pelo método de separação por quartis devido seu baixo crescimento radicular quando cultivado sob estresse por  $Al^{3+}$ , ainda assim, apresenta boa produção de massa seca total.

O cultivar ANa 7007 foi selecionado como tolerante ao  $Al^{3+}$  pelo método de separação por quartis devido ao seu alto crescimento radicular quando cultivado sob estresse por  $Al^{3+}$ , no entanto, obteve baixa produção de massa seca de parte aérea e raiz.

Os cultivares BRS Primavera e ANa 7007 obtiveram as maiores produções de grãos no experimento cultivado em solo alumínico. Com destaque especial para o cultivar ANa 7007, que apesar da baixa produção de massa seca da parte aérea foi capaz de alcançar alta produção de grãos.

Dessa forma, sugere-se estudar metodologias de seleção de cultivares, visando aumentar sua eficiência.

Ainda, há necessidades de outros testes, especialmente produção de grãos para garantir o resultado, visando confirmar se a alta produção de massa seca da planta pode realmente gerar alta produção de grãos, inclusive sob estresse por  $Al^{3+}$ .

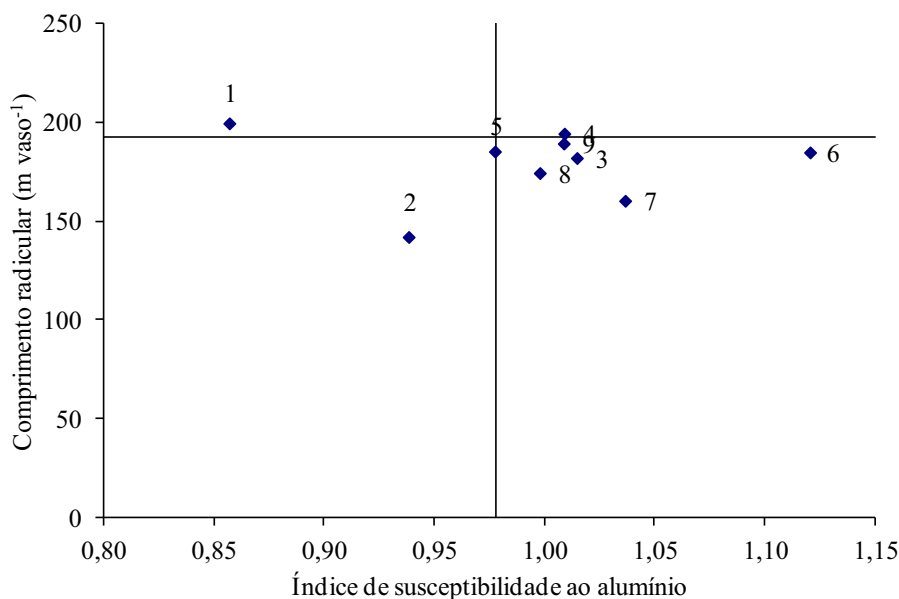
### **6.3. Experimento 3: avaliação de linhagens de mamona quanto a tolerância ao alumínio**

De acordo com a distribuição das linhagens em quartis (Figura 16), dividiu-se em dois grupos, sendo o primeiro composto por CRZ H06, H11 e H17 cujo o índice de susceptibilidade do crescimento radicular ao  $Al^{3+}$  foi menor que 0,97, estas linhagens obtiveram índice menor que a média do seu índice de susceptibilidade à toxicidade de alumínio, diminuído de 25% do seu desvio padrão, sendo assim, consideradas tolerantes ao  $Al^{3+}$ .

O segundo grupo foi composto pelas linhagens CRZ H12, H15, H18, H19, H22 e FCA, que obtiveram índice de susceptibilidade do crescimento radicular ao  $Al^{3+}$  maior que 0,97, sendo assim, considerados sensíveis a presença do  $Al^{3+}$ .

Assim, como ocorreu para o experimento 2 (Arroz), utilizou-se a distribuição das linhagens no quartis com o objetivo de separá-los em grupos quanto sua tolerância ao  $Al^{3+}$ , no entanto, as outras variáveis avaliadas foram tratadas de forma isoladas, com o objetivo de avaliar o crescimento das linhagens sob o estresse por  $Al^{3+}$ ,

mas também o cultivo sem  $\text{Al}^{3+}$  a pH 4,0, sendo este em pH ácido, e fora da faixa indicada para o cultivo de mamona.



**Figura 16.** Distribuição dos cultivares em quartis delimitados pelo comprimento radicular em  $0 \mu\text{mol L}^{-1}$  de alumínio e pelo índice de susceptibilidade do crescimento radicular à toxicidade do alumínio, nos pontos determinados pela média de comprimento radicular (sem  $\text{Al}^{3+}$ ) + 75% do seu desvio padrão e pela média de índice de susceptibilidade radicular ao alumínio - 25% do seu desvio padrão. Legenda de linhagens: 1-CRZ H06, 2-CRZ H11, 3-CRZ H12, 4-CRZ H15, 5-CRZ H17, 6-CRZ H18, 7-CRZ H19, 8-CRZ H22 e 9-FCA

As linhagens CRZ H12, H17 e FCA apresentaram melhor crescimento da parte aérea quando cultivadas sem  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 22), por outro lado, CRZ H19 e H22 apresentaram menor crescimento quando cultivados com  $\text{Al}^{3+}$ . Somente os cultivares CRZ H06 e 11 foram capazes de manter o crescimento da parte aérea semelhantes tanto quando cultivados sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$ , quanto cultivados sem  $\text{Al}^{3+}$  na solução nutritiva, demonstrando tolerância ao  $\text{Al}^{3+}$  das duas linhagens em questão observadas via quartis (Figura 16), sendo capazes de manter crescimento da parte aérea mesmo sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$ .

Somente a linhagem FCA apresentou maior diâmetro de caule quando cultivado sem  $\text{Al}^{3+}$  em relação às outras linhagens (Tabela 22). As linhagens CRZ H19 e H22 apresentaram menor diâmetro de caule quando cultivados com  $\text{Al}^{3+}$ . Todas as linhagens avaliadas apresentaram decréscimo do diâmetro do caule quando cultivadas com  $\text{Al}^{3+}$ .

A linhagem FCA apresentou maior produção de massa seca da parte aérea que as outras linhagens quando cultivadas sem  $Al^{3+}$  (Tabela 23). Quando cultivadas sob estresse por  $Al^{3+}$ , as linhagens CRZ H06, H15, H17 e FCA foram mais eficientes na produção de massa seca da parte aérea. Destaca-se as linhagens CRZ H06 e 17 pelo fato de terem sido consideradas tolerantes ao  $Al^{3+}$  segundo a classificação das linhagens em quartis.

**Tabela 22.** Média de altura de plantas e diâmetro do caule de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Altura de plantas		Diâmetro do caule	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	cm		mm	
CRZ H06	9,1bA	8,0aA	6,7bA	5,9aB
CRZ H11	8,6bA	8,3aA	7,0bA	5,8aB
CRZ H12	10,6aA	8,0aB	6,7bA	6,0aA
CRZ H15	9,9bA	8,1aB	6,9bA	5,8aB
CRZ H17	10,5aA	8,9aB	6,9bA	6,2aA
CRZ H18	9,7bA	8,0aB	6,6bA	5,6aB
CRZ H19	9,1bA	7,0bB	6,6bA	5,2bB
CRZ H22	8,9bA	6,9bB	6,6bA	5,0bB
FCA	11,1aA	9,4aB	7,7aA	6,1aB
CV(%)	10,0		2,6	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

**Tabela 23.** Média de produção de massa seca da parte aérea e radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Massa seca parte aérea		Massa seca radicular	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	-----g vaso <sup>-1</sup> -----			
CRZ H06	4,7bA	3,1aB	2,6bA	1,4aB
CRZ H11	4,3bA	2,7bB	2,5bA	1,3aB
CRZ H12	4,9bA	2,6bB	2,8aA	1,3aB
CRZ H15	5,0bA	3,1aB	2,7aA	1,5aB
CRZ H17	5,5bA	3,3aB	3,0aA	1,5aB
CRZ H18	5,0bA	2,8bB	2,8aA	1,2aB
CRZ H19	4,8bA	2,4bB	2,4bA	1,1aB
CRZ H22	4,9bA	2,4bB	2,4bA	1,1aB
FCA	6,4aA	3,1aB	2,9aA	1,3aB
CV(%)	9,2		10,7	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Dessa forma, é interessante ressaltar que a linhagem CRZ H06 é capaz de manter bom desenvolvimento da parte aérea mesmo sob estresse por  $Al^{3+}$ , corroborando sua seleção como tolerante ao  $Al^{3+}$  via quartis (Figura 16). Vale lembrar que a seleção via quartis somente leva em considerações crescimento radicular em metros.

As linhagens CRZ H12, H15, H17, H18 e FCA produziram maior quantidade de massa seca de raiz em comparação as outras linhagens quando cultivadas sem  $Al^{3+}$  (Tabela 23). Por outro lado, não houve diferença para produção de massa seca da raiz entre as linhagens quando cultivadas sob estresse por  $Al^{3+}$ . É interessante notar que mesmo não havendo diferença entre linhagens para esta variável, houve diferença para produção de massa seca de parte aérea, que pode sugerir que plantas das linhagens que obtiveram melhores resultados nesta variável, tem mecanismo interno eficiente para proporcionar bom crescimento da parte aérea mesmo com suas raízes sob estresse por  $Al^{3+}$ , reforçando assim a tese anteriormente discutida.

A linhagem FCA apresentou melhor produção de massa seca total entre todas as linhagens testadas (Tabela 24), seguida pela linhagem CRZ H17 e todas outras foram semelhantes. Dessa forma, pode-se inferir que para cultivos sem toxidez por  $Al^{3+}$  as linhagens FCA e CRZ H17 apresentaram maior eficiência, mesmo sob condição de baixo pH da solução nutritiva.

**Tabela 24.** Média de produção de massa seca total e relação raiz/parte aérea de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Massa seca total		Relação raiz/parte aérea	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	g vaso <sup>-1</sup>		-	
CRZ H06	7,4cA	4,6aB	0,55aA	0,46aB
CRZ H11	6,8cA	4,1bB	0,58aA	0,47aB
CRZ H12	7,8cA	4,0bB	0,57aA	0,50aB
CRZ H15	7,8cA	4,6aB	0,53aA	0,49aA
CRZ H17	8,5bA	4,9aB	0,55aA	0,46aB
CRZ H18	7,9cA	4,1bB	0,57aA	0,45aB
CRZ H19	7,2cA	3,5bB	0,50bA	0,48aA
CRZ H22	7,3cA	3,6bB	0,50bA	0,47aA
FCA	9,3aA	4,4aB	0,44bA	0,42aA
CV(%)	8,8		8,2	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Por outro lado, quando cultivados sob toxidez por  $Al^{3+}$ , as linhagens CRZ H06, H15, H17 e FCA obtiveram maior produção de massa seca total. Dentre essas, destaca-se a CRZ H06 e H17, que foram selecionadas como tolerantes ao  $Al^{3+}$  pela metodologia de divisão via quartis. Assim, esse resultado corrobora a seleção das linhagens em questão via quartis (comprimento radicular).

A massa seca da parte aérea, radicular (Tabela 23) e total (Tabela 24) de todas as linhagens apresentaram decréscimo quando cultivadas com  $Al^{3+}$  em comparação ao cultivo sem  $Al^{3+}$ . Demonstrando assim efeito tóxico do  $Al^{3+}$  para plantas de mamona, que mesmo linhagens consideradas tolerantes ao  $Al^{3+}$ , sofrem dano causado por este elemento tóxico.

O comprimento radicular foi usado para dividir as linhagens em grupos via quartis, dessa forma a análise desta variável de forma individual pode contribuir para melhor entendimento do resultado. As linhagens CRZ H06, H12, H15, H17, H18, H22 e FCA apresentaram maior crescimento radicular em metros quando cultivadas sem a presença de  $Al^{3+}$  (Tabela 25). No entanto, quando cultivadas sob toxidez por  $Al^{3+}$  somente a linhagem CRZ H06 obteve maior crescimento, corroborando a seleção desta como tolerante ao  $Al^{3+}$  via quartis.

**Tabela 25.** Média de comprimento e área de superfície radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Comprimento de raiz		Área de superfície	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	m vaso <sup>-1</sup>		cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	
CRZ H06	199,5aA	83,7aB	557,3aA	238,2aB
CRZ H11	142,0cA	54,4bB	483,3bA	208,3bB
CRZ H12	181,9aA	58,0bB	484,5bA	257,9aB
CRZ H15	194,2aA	57,7bB	525,9aA	267,3aB
CRZ H17	185,2aA	59,5bB	513,5aA	228,9bB
CRZ H18	184,7aA	43,6bB	550,8aA	209,9bB
CRZ H19	160,3bA	46,6bB	440,7bA	196,8bB
CRZ H22	174,3aA	54,4bB	492,8bA	214,9bB
FCA	189,2aA	57,3bB	539,1aA	218,5bB
CV(%)	9,3		8,6	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Ainda, a linhagem CRZ H18 apresentou menor valor de comprimento radicular quando cultivada sob toxidez por  $Al^{3+}$ , corroborando assim a



escolha da linhagem citada para utilização no experimento 5, sendo linhagem suscetível ao  $Al^{3+}$ . Assim como ocorreu para produção de massa seca total (Tabela 24), todas as linhagens tiveram seu comprimento, área de superfície (Tabela 25) e volume radicular (Tabela 26) influenciados negativamente quando cultivadas sob toxidez por  $Al^{3+}$  em comparação ao cultivo sem este íon. Novamente, comprovando a suscetibilidade da cultura para a toxidez causada por  $Al^{3+}$  e ao baixo pH.

**Tabela 26.** Média de volume e diâmetro radicular de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Volume		Diâmetro médio	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	cm <sup>3</sup> vaso <sup>-1</sup>		mm	
CRZ H06	8,1aA	2,9bB	0,58aA	0,50bB
CRZ H11	8,0aA	3,1bB	0,66aA	0,61aA
CRZ H12	7,5aA	3,7aB	0,62aA	0,58aA
CRZ H15	7,9aA	4,1aB	0,60aA	0,62aA
CRZ H17	7,6aA	3,4bB	0,59aA	0,59aA
CRZ H18	8,4aA	3,3bB	0,61aA	0,62aA
CRZ H19	6,3bA	2,5bB	0,57aA	0,52bA
CRZ H22	7,1bA	2,7bB	0,57aA	0,50bB
FCA	8,2aA	3,0bB	0,61aA	0,55bA
CV(%)	10,2		7,4	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Ainda, salienta-se que no cultivo sob estresse por  $Al^{3+}$  mesmo não havendo diferença de produção de massa seca de raiz (Tabela 23), houve diferença entre as linhagens para comprimento radicular (Tabela 25). A raiz sendo o alvo primário do  $Al^{3+}$  é a parte da planta onde se deve dar mais valor ao diferenciar linhagens quanto sua tolerância ao  $Al^{3+}$ . Sendo assim, pode ser que a metodologia levando como base o comprimento radicular na seleção das linhagens pode ser mais eficiente quando comparado a seleção das linhagens baseando-se somente na produção de massa seca.

As linhagens CRZ H06, H15, H17, H18, e FCA quando cultivadas sem  $Al^{3+}$ , apresentaram maior área de superfície radicular (Tabela 25). No entanto, somente as linhagens CRZ 06, H12 e H15 obtiveram maior área de superfície quando cultivadas sob estresse por  $Al^{3+}$ .

Não houve diferença entre as linhagens cultivadas sem  $Al^{3+}$  para diâmetro médio radicular (Tabela 26). No entanto, as linhagens CRZ H11, H12,

H15, H17 e H18 apresentaram maior diâmetro em comparação as outras linhagens quando cultivadas sob toxidez por  $Al^{3+}$ . Isto pode ser indício de efeito tóxico do  $Al^{3+}$  mais pronunciado nessas linhagens, devido ao espessamento radicular ser um dos principais sintomas de toxidez por  $Al^{3+}$  causado nas raízes (KOCHIAN et al., 2004).

A linhagem CRZ H06 obteve o menor teor de  $Al^{3+}$  da parte aérea entre as linhagens testadas (Tabela 27), talvez devido a isso houve bom desenvolvimento da parte aérea da linhagem em questão. Ainda, houve baixo acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea da linhagem CRZ H06.

**Tabela 27.** Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Teor		Acúmulo	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	g kg <sup>-1</sup>		mg vaso <sup>-1</sup>	
CRZ H06	0,04bB	0,07dA	0,19bA	0,23bA
CRZ H11	0,03bB	0,08cA	0,16cB	0,24bA
CRZ H12	0,05aB	0,1aA	0,26aB	0,32aA
CRZ H15	0,05aB	0,08dA	0,28aA	0,25bA
CRZ H17	0,04aB	0,08dA	0,26aA	0,28aA
CRZ H18	0,05aB	0,09cA	0,27aA	0,25bA
CRZ H19	0,04bB	0,09cA	0,22bA	0,22bA
CRZ H22	0,04aB	0,08dA	0,24aA	0,20bA
FCA	0,04aB	0,1bA	0,31aA	0,34aA
CV(%)	9,2		13,1	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

Destaca-se a linhagem FCA, que ao mesmo tempo em que obteve alto teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea, foi capaz de produzir a maior quantidade de massa seca da parte aérea entre as linhagens testadas (Tabela 23), explicando-se assim, seu alto acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea.

Quanto ao teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz chama-se a atenção para o alto teor e acúmulo na linhagem CRZ H06 (Tabela 28). Ao que tudo indica, a linhagem CRZ H06 é capaz de compartimentalizar o  $Al^{3+}$  em formas não tóxicas no interior da planta, e ainda diminuir a translocação deste para a parte aérea (Tabela 27), o que garante o crescimento da planta, especialmente da parte aérea.

Por outro lado, chama a atenção o baixo teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz da linhagem CRZ 18 (suscetível ao  $Al^{3+}$ ) (Tabela 28), onde, mesmo em menor

quantidade, a linhagem em questão não foi eficiente em tolerar o  $Al^{3+}$ , influenciando de forma negativa seu crescimento, especialmente o comprimento radicular.

**Tabela 28.** Média do teor e acúmulo de alumínio na raiz de linhagens de mamona cultivadas com e sem alumínio

Linhagens	Teor		Acúmulo	
	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$	S/ $Al^{3+}$	C/ $Al^{3+}$
	g kg <sup>-1</sup>		mg vaso <sup>-1</sup>	
CRZ H06	0,1aB	9,4bA	0,6aB	13,5aA
CRZ H11	0,1aB	9,7bA	0,4aB	12,6aA
CRZ H12	0,1aB	9,6bA	0,5aB	13,3aA
CRZ H15	0,2aB	9,1bA	0,6aB	13,9aA
CRZ H17	0,2aB	8,6cA	0,7aB	13,6aA
CRZ H18	0,2aB	8,8cA	0,6aB	11,3bA
CRZ H19	0,1aB	9,7bA	0,5aB	11,2bA
CRZ H22	0,2aB	8,3cA	0,6aB	9,7bA
FCA	0,1aB	11,2aA	0,4aB	14,8aA
CV(%)	13,1		21,0	

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste Scott Knott

De maneira geral as linhagens FCA e CRZ H17 apresentaram melhor desenvolvimento global em condições sem toxidez por  $Al^{3+}$  (pH 4,0), especialmente devido a altura de plantas (Tabela 22), produção de massa seca de raiz (Tabela 23) e total (Tabela 24), comprimento, área de superfície (Tabela 25) e volume radicular (Tabela 26). Ainda, chama-se a atenção da boa relação raiz e parte aérea da linhagem FCA (Tabela 24), proporcionando bom crescimento da parte aérea e raiz.

Quanto às linhagens mais eficientes na presença de  $Al^{3+}$ , destaca-se a CRZ H06 e H17, devido seus resultados mais representativos de altura de plantas (Tabela 22), produção de massa seca de parte aérea (Tabela 23) e total (Tabela 24), e especificamente para a linhagem CRZ H06 comprimento radicular e área de superfície (Tabela 25). Ainda, sugere-se realizar novos testes em campo para avaliar a produção de grãos e óleo das linhagens em questão cultivadas sob estresse por  $Al^{3+}$ .

Assim, as linhagens selecionados para utilização no experimento 5, foram CRZ 06 (tolerante ao  $Al^{3+}$ ) e CRZ 18 (suscetível ao  $Al^{3+}$ ). Salienta-se, que foi levado em consideração na seleção das linhagens para utilização no experimento 5 a escolha de dois cultivares com crescimento radicular semelhantes quando cultivados sem  $Al^{3+}$  (Figura 16), visando manter padrão de crescimento radicular.

### 6.3.1. Considerações finais

De acordo com a distribuição das linhagens em quartis dividiu-se as linhagens em dois grupos. Grupo tolerante ao  $Al^{3+}$ : CRZ H06, H11 e H17; grupo suscetível ao  $Al^{3+}$ : CRZ H12, H15, H18, H19, H22 e FCA.

As linhagens selecionadas para utilização no experimento 5 foram o CRZ H06 (tolerante ao  $Al^{3+}$ ) e CRZ H18 (suscetível ao  $Al^{3+}$ ).

Analisando os resultados de maneira isolada, as linhagens FCA e CRZ H17 apresentaram melhor desenvolvimento global em condições sem toxidez por  $Al^{3+}$  (pH 4,0). Enquanto que as linhagens mais eficientes na presença de  $Al^{3+}$  foram CRZ H06 e H17.

Considera-se necessário realizar novos testes em campo, especialmente visando avaliar a produção de grãos e óleo das linhagens em questão sob condições de estresse por  $Al^{3+}$ .

### 6.4. Experimento 4: interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas (cultura acumuladora de Si)

As combinações sem presença de  $Al^{3+}$  ou com Si apresentaram melhor desempenho ao comparar com os tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$ , especialmente altura de plantas, número de perfilhos por planta, massa seca de raiz e total (Tabela 29) e os parâmetros radiculares (Tabela 30).

**Tabela 29.** Média de altura de plantas, número de perfilhos por planta, produção de massa seca da parte aérea, raiz e total de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Altura de plantas	Número de perfilhos por planta	MS – Parte aérea	MS – Raiz	MS – Total
	cm	nº	-----g vaso <sup>-1</sup> -----		
0 $Al^{3+}$ e Si	50,1a	4,5a	11,4b	5,9a	17,3a
1,7 Si	50,3a	4,6a	12,1a	5,9a	18,0a
1,4 $Al^{3+}$	46,5c	4,2b	10,6c	3,4b	14,0c
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	47,6b	4,2b	11,9ab	3,3b	15,3b
-----					
Cultivares					
Maravilha	47,6b	4,3	11,1b	4,8a	15,9
ANA7007	49,6a	4,4	12,0a	4,4b	16,4
CV(%)	1,9	4,6	6,4	7,4	6,0

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 30.** Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Comprimento	Área de	Volume	Diâmetro
	de raiz	superfície		médio
	m vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> vaso <sup>-1</sup>	mm
0 $Al^{3+}$ e Si	1138,7a	9597,2a	65,5a	0,27b
1,7 Si	1201,3a	9321,3a	60,8a	0,25b
1,4 $Al^{3+}$	368,1b	3394,7b	26,0b	0,30a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	340,0b	3185,0b	25,1b	0,32a
Cultivares				
Maravilha	714,9b	6417,6	47,4a	0,31a
ANA7007	809,2a	6331,5	41,3b	0,26b
CV(%)	11,8	8,7	14,5	11,5

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

No entanto, o Si foi capaz de manter a produção de massa seca da parte aérea do tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  semelhante à produção obtida pelos dois tratamentos cultivados sem a presença de  $Al^{3+}$ , e ainda, obteve maior produção de massa seca em comparação ao tratamento 1,4  $Al^{3+}$ . Ou seja, o Si foi capaz de amenizar a toxidez causada por  $Al^{3+}$ , aumentando ou mantendo a produção de massa seca da parte aérea. Ainda, a combinação 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  obteve maior altura de plantas em comparação ao tratamento 1,4  $Al^{3+}$ , portanto, esta variável contribuiu para explicar a maior produção de massa seca da parte aérea.

Conseqüentemente, a combinação 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  resultou em maior produção de massa seca total em comparação a combinação 1,4  $Al^{3+}$ . Isso ocorreu, devido a influência do Si na produção de massa seca da parte aérea, portanto, influenciando também a produção de massa seca total.

É importante citar que o comportamento acima observado ocorreu para ambos os cultivares, não havendo interações significativas entre cultivares e combinações de Si e  $Al^{3+}$ . Dessa forma, o Si pode beneficiar plantas de arroz de terras altas sob estresse por  $Al^{3+}$ , sendo elas tolerantes ou sensíveis ao  $Al^{3+}$ .

Ao comparar os cultivares de forma isolada, observou-se que o cultivar tolerante ao  $Al^{3+}$  (ANa 7007) obteve maior altura de parte aérea e produção de massa seca da parte aérea (Tabela 29). No entanto, o cultivar Maravilha apresenta maior produção de massa seca de raiz. Provavelmente, isso ocorreu porque as raízes do cultivar Maravilha apresentaram maior diâmetro médio, contribuindo assim para explicar seu maior valor de massa seca radicular.

O Si não influenciou os parâmetros radiculares de plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  (Tabela 30). O benefício ficou restrito somente para a parte aérea das plantas de arroz. Inicialmente a ação tóxica do  $Al^{3+}$  ocorre nas raízes (BHUJA et al., 2004, MA et al., 2004; KOCHIAN, 2004), e mesmo o Si contribuindo para amenizar a toxidez na parte aérea das plantas, não houve nenhum efeito benéfico deste nas raízes cultivadas com  $Al^{3+}$ .

A toxidez por  $Al^{3+}$  causada na parte aérea, é um reflexo do dano causado nas raízes (SILVA et al., 2010), dessa forma, pode ser que o Si contribua para diminuir a translocação de  $Al^{3+}$  para parte aérea e ou fisiologicamente via mecanismos específicos mediados por este, especialmente, porque o  $Al^{3+}$  normalmente é acumulado preferencialmente no sistema radicular das plantas, sendo pequena a quantidade translocada para a parte aérea (BEUTLER et al., 2001). Portanto, a mitigação da toxidez por  $Al^{3+}$  mediada pelo Si ocorreu no interior da planta de arroz de terras altas.

Por outro lado, Giongo e Bohnen (2011), observaram amenização da toxidez causada por  $Al^{3+}$  em raízes de plantas de arroz irrigado mediada pelo Si, isso ocorreu devido o maior crescimento radicular de plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas cultivadas somente na presença de  $Al^{3+}$ .

Ao contrário do diâmetro radicular médio obtido via software (Tabela 30), o diâmetro, espessura de cortex, espessura parede do xilema e número de elemento de vaso em raízes não foram diferentes entre os tratamentos (Tabela 31). Isso contrapõe a hipótese de que o  $Al^{3+}$  aumenta a espessura radicular (KOCHIAN, 2004), pelo menos a nível celular.

Ribeiro (2011) obteve outro resultado testando a tolerância ao  $Al^{3+}$  do cultivar Maravilha. O autor observou maior espessura do ápice radicular em plantas do referido cultivar quando cultivado sob  $Al^{3+}$  em comparação ao cultivar sem este íon tóxico.

Houve maior ação tóxica do  $Al^{3+}$  em raízes de diâmetro finas em comparação a raízes médias e grossas (analisadas via software Winrhizo) (Tabela 32). O decréscimo de comprimento nos diâmetros radiculares nas classes de raízes médias e grossas na presença de  $Al^{3+}$  são inferiores ao decréscimo ocorrido para raízes finas. Assim, a proporção de raízes finas versus grossas+médias diminuiu ao passo que se adicionou  $Al^{3+}$  a solução, esse comportamento é melhor observado na Figura 17.

**Tabela 31.** Média de diâmetro, espessura de cortex, espessura por xilema e número de elemento de vaso em raízes (microscopia eletrônica) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

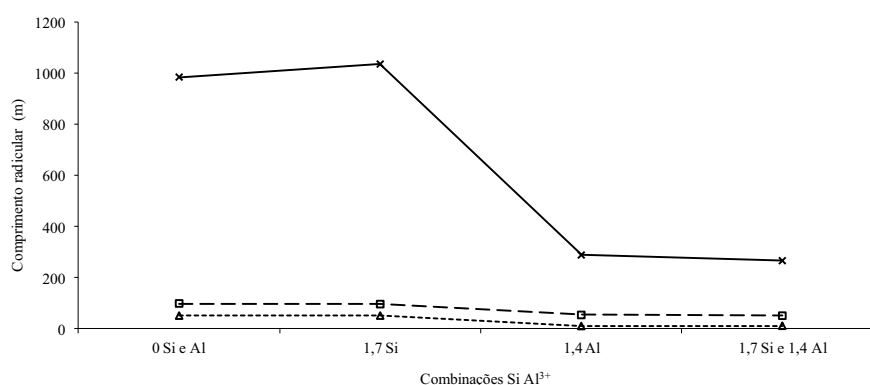
Combinações	Diâmetro de Raiz	Espessura de cortex	Espessura parede xilema	Número elemento de vaso
	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	-
0 $Al^{3+}$ e Si	442,2	169,1	1,6	1,6
1,7 Si	401,1	148,0	1,1	1,8
1,4 $Al^{3+}$	385,6	140,8	1,5	1,7
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	455,8	166,8	1,7	1,7
-----				
Cultivares				
Maravilha	396,1	147,4	1,6	1,3b
ANA7007	446,3	165,0	1,3	2,1a
CV(%)	20,9	20,2	34,1	39,9

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 32.** Média de comprimento radicular dentro de classes de diâmetro (finas, médias e grossas) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Finas	Médias	Grossas
	-----m-----		
0 $Al^{3+}$ e Si	986,4a	99,9a	52,3a
1,7 Si	1037,4a	97,3a	52,4a
1,4 $Al^{3+}$	289,5b	54,8b	11,6b
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	267,3b	51,9b	12,6b
-----			
Cultivares			
Maravilha	601,8b	68,5b	31,0b
ANA7007	688,5a	83,5a	33,4a
CV(%)	10,4	10,0	9,9

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade



**Figura 17.** Ilustração da diferença de comprimento radicular nas classes de diâmetros, finas (x), médias (□) e grossas (Δ) de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Em outras palavras, a proporção entre raízes grossas+médias em relação à finas em plantas sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  se torna menor em comparação aos tratamentos sem  $\text{Al}^{3+}$ , com isso, pode-se levantar a hipótese de que o diâmetro médio mensurado via software WinRhizo (Tabela 30) foi maior devido a esse fator. É importante citar que raízes mais grossas, tem menor capacidade de absorção de água e nutrientes, ao passo que as raízes longas e finas são mais eficientes na absorção de nutrientes do solo (MISTRO et al., 2001; WANG et al., 2006; ZONTA et al., 2006).

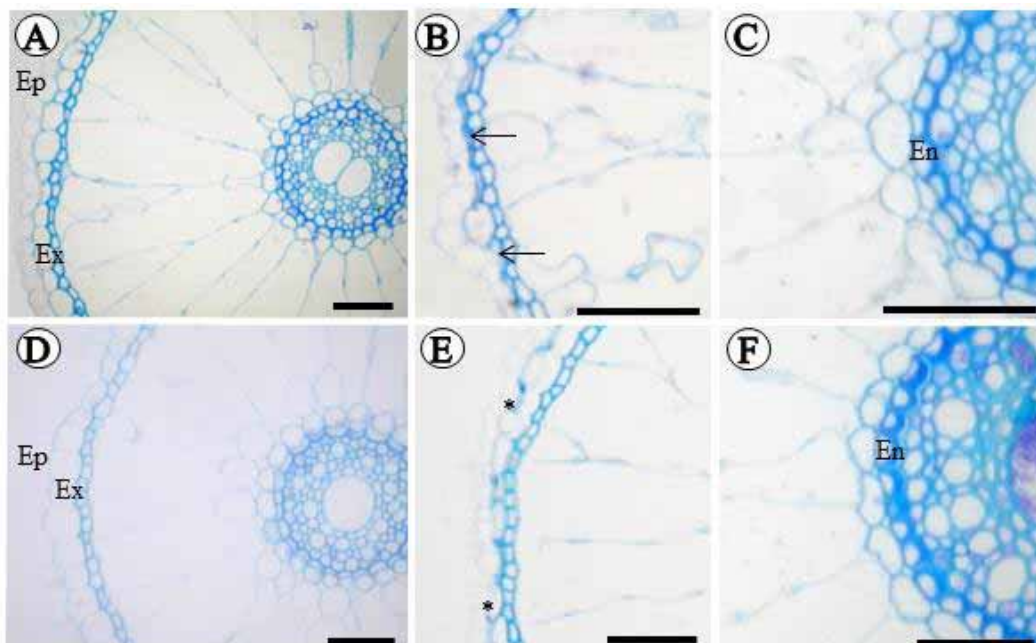
Encontra-se nas Figuras 18 e 19 as imagens dos cortes anatômicos de raízes de arroz, transversal e longitudinal, respectivamente. De forma geral, com base na descrição visual das secções transversais e longitudinais das raízes, verificou-se que a organização anatômica da região de absorção das raízes de arroz tolerante ao alumínio (Figura 18A) foi semelhante àquela das raízes do cultivar suscetível a este elemento (Figura 18D). Ou seja, a anatomia dos cultivares foram semelhantes.

Em secção transversal de ambos cultivares, a epiderme uniestratificada é composta por células arredondas e justapostas (Figura 18A, B, D e E); células epidérmicas sofrem expansão tubular e se diferenciam em pelos radiculares. O córtex é constituído por exoderme formada por células parenquimáticas com paredes pecto-celulósicas com alguma deposição de suberina, uma camada de células menos volumosas com paredes lignificadas, uma ampla região composta por células parenquimáticas com grandes lacunas de ar (Figura 18A, B, D, E), uma camada mais interna de células parenquimáticas justapostas e endoderme constituída por células com estrias de Caspary e espessamentos parietais adicionais lignificados em formato de “U” (Figura 18A, C, D, F).

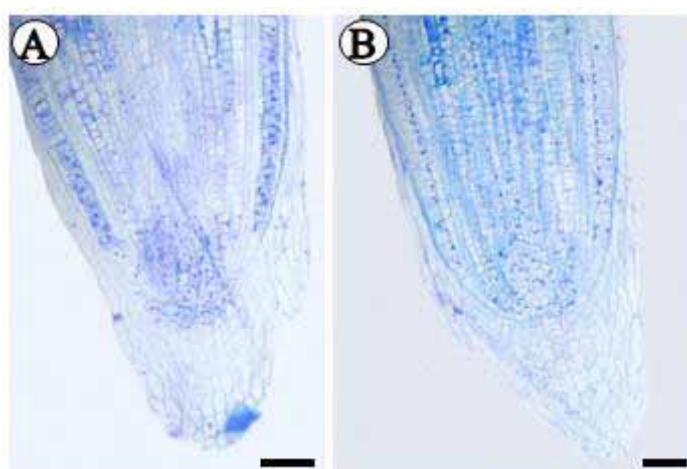
Em algumas amostras obtidas de plantas que receberam tratamento com  $\text{Al}^{3+}$ , as células da exoderme demonstraram retração do protoplasto e diminuição do volume (Figura 18B e E). Isso resulta em desestruturação celular, que pode acarretar na perda de função dessas células (BENNET; BREEN, 1991; ELEFTHERIOU et al., 1993)

No cultivar tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ , a combinação de 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 18C) acarretou discretas alterações estruturais, estas, semelhantes às visualizadas no tratamento 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 18B). Porém, no cultivar suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ , as células corticais mais externas dos indivíduos submetidos ao tratamento 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 18F) mantiveram características semelhantes ao tratamento 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 18D).





**Figura 18.** Secções transversais de raízes de arroz submetidas a diferentes tratamentos. Cultivar tolerante ao alumínio (A-C). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (A). 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (B). 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (C); Cultivar suscetível ao alumínio (D-F). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (D). 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (E). 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (I-J). En: endome; Ep: epiderme; Ex: exoderme; setas indicam células da exoderme colapsadas; asteriscos indicam células da epiderme e da exoderme colapsadas. Barras: 50  $\mu\text{m}$



**Figura 19.** Secções longitudinais da raiz de arroz do cultivar tolerante ao alumínio. 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (A). 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (B). Barras: 50  $\mu\text{m}$

O cilindro vascular apresenta periciclo constituído por células lignificadas e xilema e floema primários intercalados (Figura 18A e C). No cultivar tolerante ao alumínio, as raízes apresentam de um a quatro elementos de vaso do metaxilema, sendo mais frequente a ocorrência de duas dessas células (Figura 18A); já no cultivar suscetível ao alumínio, observa-se a presença de um a três elementos de vaso do

metaxilema, sendo que na maioria das raízes foi encontrada apenas uma célula diferenciada na região central do órgão (Figura 18D).

Corroborando o resultado acima descrito, verifica-se na Tabela 31 que houve diferença significativa entre os cultivares para número de elementos de vaso. O cultivar tolerante ao  $Al^{3+}$  obteve maior número de elemento de vaso em comparação ao suscetível. Essa característica pode ser favorável ao cultivar tolerante devido ao fato de o número de elementos de vaso estar relacionado com a segurança no transporte de água e nutrientes (EVERT, 2006), de forma que uma planta que tem maior número de elementos de vaso é favorecida. Portanto, uma vez que um elemento de vaso é bloqueado, inibindo fisicamente o transporte apoplástico entre células, haverá outros vasos garantindo a condução de água e nutrientes (JACOBSEN et al., 2005). É importante citar que, o elemento de vaso pode ser bloqueado por deposição de caloses mediada pelo  $Al^{3+}$  (SIVAGURU et al., 2000) ou até por embolismo (EVERT, 2006).

Essa hipótese discutida anteriormente é confirmada por Meriga et al. (2003), que trabalhando com dois cultivares de arroz, com tolerância diferencial ao  $Al^{3+}$ , mostraram que as plântulas expostas ao  $Al^{3+}$  apresentavam formação de calose, acúmulo de  $Al^{3+}$  e peroxidação de lipídios.

Por outro lado, não foram encontradas diferenças anatômicas no cilindro vascular entre os indivíduos cultivados sem Si e  $Al^{3+}$  e aqueles que receberam 1,4  $Al^{3+}$ , 1,7 Si ou 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$ , confirmando que essa é uma característica genética da planta, a qual não foi influenciada pelos tratamentos.

Em secções longitudinais, na região apical das raízes de arroz sensíveis e tolerantes ao alumínio, observa-se a presença de coifa bem desenvolvida que protege a região meristemática (Figura 19A e B). No entanto, a raiz cultivada sob 1,4  $Al^{3+}$  apresentou leve abaulamento no ápice radicular (Figura 19B).

Em plantas submetidas ao tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  a zona meristemática apresentou cerca de 150  $\mu m$  de comprimento (Figura 19A). Enquanto que nas plantas submetidas ao tratamento 1,4  $Al^{3+}$  a zona meristemática ocupa cerca de 176  $\mu m$  de comprimento (Figura 19B), enquanto que em plantas que receberam 1,7 Si e  $Al^{3+}$  a zona meristemática ocupou 170  $\mu m$ . Os resultados citados ocorreram de forma semelhante para ambos os cultivares

As células da raiz são formadas na zona meristemática. Essas células são formadas e vão se especializando, em epiderme, tecido vascular e em todas as

células do vegetal (VEPRASKAS, 1994; EVERT, 2006). Entretanto, na raiz submetida ao tratamento 1,4  $\text{Al}^{3+}$  as células se mantiveram indiferenciadas por maior tempo, portanto, por esse motivo, a zona de células meristemáticas do tratamento em questão foi maior, caracterizando assim, em dano causado por  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 19B).

Essas observações corroboram as observações de Eleftheriou et al. (1993) e Sivaguru e Horst (1998), que citam o ápice das raízes como sendo o sítio de ação primária do  $\text{Al}^{3+}$ , região onde as células estão entrando em fase de alongamento (coifa ou meristema apical). Isso provavelmente ocorre, porque o  $\text{Al}^{3+}$  interfere na divisão celular da raiz, devido ao aumento da estabilidade da dupla hélice, dificultando, portanto, a replicação de DNA na intérfase (MORIMURA; MATSUMOTO, 1978).

No entanto, apesar do maior tempo para se diferenciarem, não foram observados danos a nível celular em células meristemáticas no presente trabalho. Delima e Copeland (1994) citam que os efeitos sobre as células meristemáticas das raízes tornam-se evidentes apenas após exposição mais prolongada ao  $\text{Al}^{3+}$ . Nesse sentido, talvez o tempo em que as raízes ficaram em contato com o  $\text{Al}^{3+}$  não foi suficiente para causar danos visíveis.

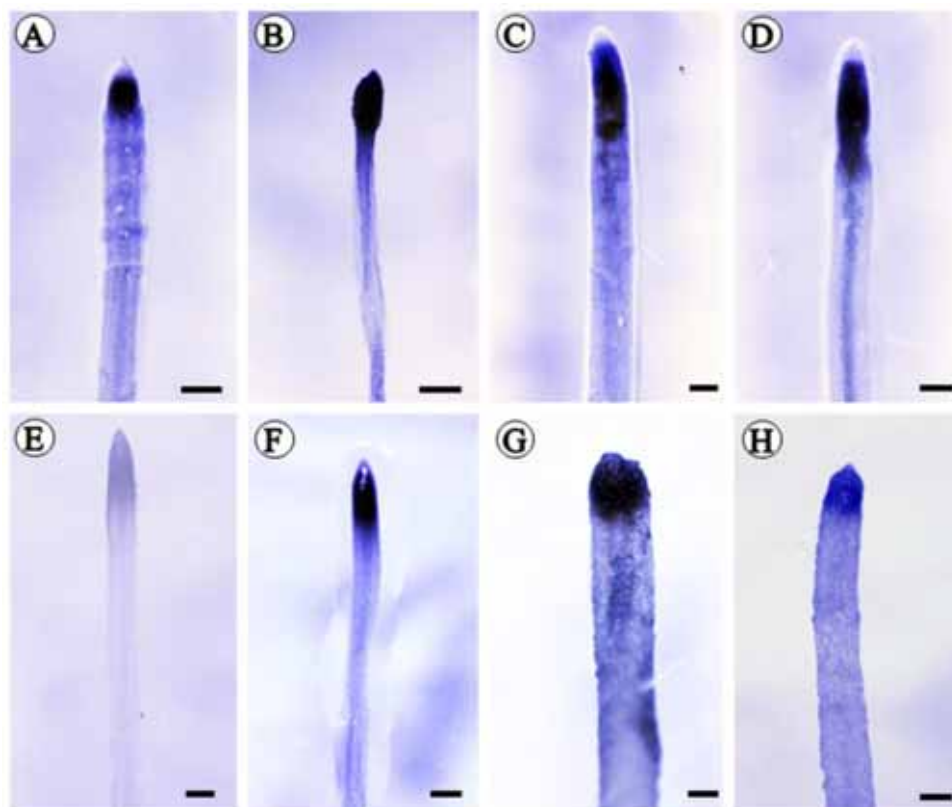
Os resultados obtidos no presente trabalho diferem de Peixoto et al. (2007), que observaram a presença de células colapsadas em cortes longitudinais dos ápices radiculares de sorgo crescidos na presença de  $\text{Al}^{3+}$ .

Visando detectar regiões de acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  nos ápices radiculares foi empregado o método de coloração das raízes com hematoxilina férrica (POLLE et al., 1978). Miftahudin et al. (2007) citam que quanto maior acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  nos ápices radiculares, mais escura será a coloração por hematoxilina e por consequência mais suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  a planta será. As figuras referentes a coloração de raízes com hematoxilina férrica são demonstradas na Figura 20.

Não houve diferença visual entre a coloração dos meristemas apicais entre os tratamentos. Portanto, a coloração das raízes não contribuiu para melhor visualização e diferenciação de tratamentos quanto ao dano do  $\text{Al}^{3+}$  no meristema apical das raízes de plantas de arroz, ainda, fica clara a não interferência do Si para diminuir a toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  na raiz.

Inclusive, em tratamentos cultivados sem a presença de  $\text{Al}^{3+}$  foi observado dano ao meristema, assim, pode ser que plantas de arroz no presente trabalho tinham danos causados em seus meristemas apicais em todos tratamentos, no entanto, estas

foram capazes de crescerem adequadamente. Ainda, pode ser que o pH 4,0 tenha causado dano aos meristemas radiculares, mas, mesmo as plantas de arroz serem capazes de suportar pH ácidos, essa "tolerância" pode ser que ocorra mesmo com o meristema radicular afetado.



**Figura 20.** Morfologia externa da raiz de arroz cultivada em solução nutritiva e tratada com hematoxilina férrica. Cultivar tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $Al^{3+}$  (A). 1,7 Si (B). 1,4  $Al^{3+}$  (C). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (D); Cultivar suscetível ao alumínio (E-H). 0 Si e  $Al^{3+}$  (E). 1,7 Si (F). 1,4  $Al^{3+}$  (G). 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  (H). Barras: 0,12 mm

Os resultados obtidos corroboram Braccini et al. (2000), que concluíram que o teste de coloração com hematoxilina não se caracterizou como um método eficiente para diferenciar genótipos de café quanto à tolerância ao Al. Ryan et al. (1993) citam que independentemente de sua eficiência, essa metodologia não deve ser aplicada de forma isolada visando diferenciar grau de toxidez causada por  $Al^{3+}$ .

Por outro lado, estes resultados foram diferentes aos obtidos por Doncheva et al. (2005), que observaram em cultivares de milho resistentes ao  $Al^{3+}$ , raízes com coloração mais claras por hematoxilina quando tratada com  $Al^{3+}$  em relação ao cultivar suscetível, sendo este menos escuro, demonstrando maior exclusão do Al pelas raízes de plantas tolerantes.

Ainda, Ribeiro (2011), testando a tolerância do cultivar de arroz de terras altas Maravilha, observou diferença na coloração dos ápices radiculares do referido cultivar tratados com hematoxilina, com coloração mais escura quando cultivado sob a presença de  $Al^{3+}$ .

É interessante notar, que apesar da análise microscópica não detectar diferença no diâmetro radicular entre os tratamentos (Tabela 31), fica evidente na Figura 20 a diferença de espessura do ápice radicular entre os tratamentos cultivados na presença de  $Al^{3+}$  em relação a sem  $Al^{3+}$ . O que confirma a hipótese de que o  $Al^{3+}$  aumenta a espessura radicular. Ainda, observou-se maior espessura dos tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$  em comparação com cultivo sem  $Al^{3+}$  para o cultivar suscetível ao  $Al^{3+}$  em comparação ao tolerante. Comportamento este, também observado por Delhaize e Ryan (1995), Sasaki et al. (1996), Peixoto et al. (2007) e Ribeiro (2011).

Os tratamentos cultivados sem  $Al^{3+}$  apresentaram maiores valores de relação raiz e parte aérea (Tabela 33). Isso ocorreu porque havia maior área de raiz nos referidos tratamentos para suprir a necessidades da planta durante seu crescimento. No entanto, vale ressaltar que em experimento com  $Al^{3+}$ , essa variável deve ser tratada com devida precaução, uma vez que o efeito tóxico do  $Al^{3+}$  se dá nas raízes, por consequência influenciam negativamente o crescimento radicular (massa seca) (Tabela 29), dessa forma, o valor de relação raiz e parte aérea será menor em comparação a plantas sem estresse por  $Al^{3+}$ .

**Tabela 33.** Média de relação raiz - parte aérea e eficiência de utilização de silício de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Relação raiz -	Eficiência de
	parte aérea	utilização de
		Si
	-	$g\ mg^{-1}$
0 Si e $Al^{3+}$	0,51a	0,11a
1,7 Si	0,49b	0,02b
1,4 $Al^{3+}$	0,32c	0,11a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	0,28d	0,02b
-----		
Cultivares		
Maravilha	0,43a	0,07
ANA7007	0,37b	0,06
CV(%)	5,0	13,2

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade

Assim, deve-se comparar somente os dois tratamentos cultivados sob toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ , onde, o tratamento 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  obteve menor valor de relação raiz e parte aérea em comparação ao tratamento 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 33). Isso provavelmente ocorreu, devido a maior produção de massa seca da parte aérea observada no tratamento 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 29).

Portanto, apesar do  $\text{Al}^{3+}$  afetar a produção de massa seca radicular dos dois tratamentos cultivados sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  de forma semelhante (Tabela 29), o Si mediou maior produção de massa seca na parte aérea no tratamento 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 29), por consequência contribuiu para menor relação raiz e parte aérea do mesmo tratamento em relação ao tratamento 1,4  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 33), demonstrando assim sua maior eficiência em produzir massa seca com baixa produção radicular.

Encontra-se nas Tabelas 34, 35, 36, 37 e 38 as médias do teor e acúmulo de N, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Fe, Zn, Si e  $\text{Al}^{3+}$  na parte aérea e raiz de plantas de arroz de terras altas. De maneira geral, o teor e acúmulo de macro e micronutrientes na parte aérea e raiz foram maiores nos tratamentos que não continham  $\text{Al}^{3+}$ .

**Tabela 34.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	35a	1,5ab	32a	5a	2,3a	2,3a
1,7 Si	35a	1,7a	33a	4b	2,0b	2,2b
1,4 $\text{Al}^{3+}$	33b	1,6a	30b	3c	1,0c	1,9c
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	30c	1,4b	27c	2d	1,0c	1,7d
CV(%)	5,5	11,2	5,4	7,1	4,7	5,0
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----					g kg <sup>-1</sup>
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	36a	12	226a	251a	38a	8b
1,7 Si	28b	13	201b	215b	35a	36a
1,4 $\text{Al}^{3+}$	33a	14	135c	221b	22b	9b
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	23c	12	104d	166c	18c	37a
CV(%)	12,0	15,9	9,6	8,5	10,8	10,1

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade

As combinações sem  $\text{Al}^{3+}$  proporcionaram maiores teores e acúmulo de nutrientes na raiz (Tabela 36 e 37), no entanto há exceção para teores B, Cu e Fe, nutrientes estes que podem ter havido efeito de concentração nas raízes, devido ao efeito tóxico do  $\text{Al}^{3+}$  no crescimento radicular, e a consequente menor produção de massa

seca de raiz em comparação as combinações sem  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 29). Esse efeito é confirmado ao analisar os resultados de acúmulo B e Fe na raiz (Tabela 37), onde houve maior acúmulo de B e Fe nos tratamentos sem  $\text{Al}^{3+}$  e Cu.

**Tabela 35.** Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- mg vaso <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	425a	19,0ab	388a	66a	28,5a	28,5a
1,7 Si	428a	20,9a	406a	57b	25,3b	26,9a
1,4 $\text{Al}^{3+}$	353b	17,9b	322b	36c	11,6c	20,9b
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	368b	17,6b	342b	35c	12,7c	21,6b
CV(%)	6,2	11,8	9,9	9,0	7,5	8,4
Combinações	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	----- µg vaso <sup>-1</sup> -----					mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	427a	149	2727a	3021a	458a	107b
1,7 Si	348b	160	2464b	2625b	435a	453a
1,4 $\text{Al}^{3+}$	356b	153	1442c	2374c	243b	98b
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	283c	153	1286c	2059d	229b	469a
CV(%)	13,5	16,9	11,7	7,8	15,2	11,9

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 36.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	19bc	1,2b	28	1,25a	1,4a	1,7
1,7 Si	17c	1,2b	29	1,18a	1,4a	1,7
1,4 $\text{Al}^{3+}$	21a	2,1a	26	1,05b	0,5b	1,7
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	20ab	2,0a	24	1,15ab	0,5b	1,7
CV(%)	8,4	9,1	13,3	9,8	20,0	5,8
Combinações	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----					g kg <sup>-1</sup>
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	34b	31b	25ab	105b	53a	4,3b
1,7 Si	33b	33b	28a	1053b	47a	4,6b
1,4 $\text{Al}^{3+}$	45a	56a	22b	1633a	38b	4,7b
1,7 Si e 1,4 $\text{Al}^{3+}$	42a	56a	20b	1218b	32b	5,8a
CV(%)	9,3	22,7	18,6	13,4	14,9	9,8

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 37.** Média de acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	mg vaso <sup>-1</sup>					
0 Si e $Al^{3+}$	121a	8,1	179a	7a	9,2a	10,9a
1,7 Si	106b	7,7	173a	7b	9,1a	10,7a
1,4 $Al^{3+}$	73c	7,5	91b	3c	1,9b	5,8b
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	71c	7,1	84b	3c	1,9b	6,0b
CV(%)	11,1	10,2	13,8	12,9	23,5	6,5
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	μg vaso <sup>-1</sup>					mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	217a	196	160a	6695a	336a	27a
1,7 Si	197a	199	170a	6315a	287b	27a
1,4 $Al^{3+}$	153b	186	77b	5456b	127c	16c
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	145b	182	71b	4049c	111c	20b
CV(%)	12,0	19,5	23,7	11,5	15,3	10,8

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 38.** Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Parte aérea		Raiz	
	Teor de $Al^{3+}$	Acúmulo de $Al^{3+}$	Teor de $Al^{3+}$	Acúmulo de $Al^{3+}$
	g kg <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	0,06c	0,84c	0,27b	1,7b
1,7 Si	0,06c	0,82c	0,26b	1,6b
1,4 $Al^{3+}$	0,37a	4,04a	2,17a	7,4a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	0,29b	3,60b	2,18a	7,3a
Cultivares				
Maravilha	0,21a	2,34	1,13b	4,8a
ANA7007	0,18b	2,31	1,31a	4,2b
CV(%)	13,2	16,3	12,0	10,4

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Dessa forma, teor e acúmulo de macro e micro nutrientes não contribuíram para explicar a maior produção de massa seca da parte aérea do tratamento Si e  $Al^{3+}$  em comparação ao somente  $Al^{3+}$  (Tabela 29), tendo em vista que o Si não proporcionou aumento de nenhum teor ou acúmulo de nutrientes na parte aérea.

O Si quando aplicado com  $Al^{3+}$  proporcionou maior teor e acúmulo de Si na parte aérea em comparação a combinação somente  $Al^{3+}$  (Tabela 34 e 35). Ainda, a combinação Si aplicada com  $Al^{3+}$  contribuiu para menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte



aérea em comparação ao tratamento somente  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 38), demonstrando que quando há Si na solução pode haver menor translocação de  $\text{Al}^{3+}$  para a parte aérea e/ou o  $\text{Al}^{3+}$  permanecer ligado ao Si nas raízes.

Portanto, o Si quando aplicado com  $\text{Al}^{3+}$ , proporcionou além de maior teor e acúmulo de Si na parte aérea, menor teor e acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  em comparação ao tratamento somente  $\text{Al}^{3+}$ , assim, fica evidente que o Si pode influenciar na amenização da toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ .

Ainda, não houve diferença entre os tratamentos 1,7 Si e 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  para eficiência de utilização de Si (Tabela 33). Dessa forma, o tratamento sob toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  obteve a mesma eficiência em comparação ao tratamento sem toxidez, mesmo sofrendo influência negativa do  $\text{Al}^{3+}$  na absorção de íon em geral.

É interessante citar que, de acordo com Korndörfer et al. (1999) as plantas de arroz do presente trabalho que foram cultivadas com Si podem ser consideradas altamente acumuladoras de Si, uma vez que os teores obtidos foram acima de  $34 \text{ g kg}^{-1}$  (Tabela 34).

Por outro lado, não houve diferença entre as combinações 1,7 Si e 1,4  $\text{Al}^{3+}$  e somente  $\text{Al}^{3+}$  para teor acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  na raiz (Tabela 38), confirmando assim os resultados obtidos para massa seca (Tabela 29) e parâmetros radiculares (Tabela 30) nos tratamentos em questão, os quais também não foram influenciados pela aplicação de Si. Pode-se levantar a hipótese de que o Si não diminui a absorção de  $\text{Al}^{3+}$  pelas raízes, mas o transforma em forma não tóxica as plantas e/ou diminui sua translocação para parte aérea, amenizando a toxidez causada por  $\text{Al}^{3+}$  na parte aérea das plantas de arroz de terras altas.

A tolerância ao alumínio pode ser explicada via dois mecanismos: no primeiro, denominado mecanismo de exclusão, o alumínio é impedido de chegar aos seus sítios de toxicidade nas plantas, no entanto é no segundo mecanismo que o ocorrido no presente trabalho se encaixa melhor. Este que é conhecido como mecanismo interno, onde possibilita a entrada do  $\text{Al}^{3+}$  na célula, tendo a sua toxidez neutralizada por enzimas, e ou isolada no interior do vacúolo. Além destes, outros mecanismos bioquímicos têm sido propostos, porque conferem às plantas condição de inativar ou armazenar o alumínio nas folhas em formas não tóxicas (ABICHEQUER et al., 2003; MARIANO et al., 2005; FERNANDES, 2006).

Ao comparar os cultivares, o teor de  $\text{Al}^{3+}$  na parte aérea do cultivar tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$  foi menor em comparação ao suscetível (Tabela 38). Por outro lado, o

teor de  $Al^{3+}$  na raiz do cultivar tolerante foi maior do que o cultivar suscetível. Isso pode ter ocorrido porque uma das estratégias dos cultivares tolerantes ao  $Al^{3+}$  é permitir que a planta acumule o  $Al^{3+}$  na raiz, inativando ou armazenando-o em formas não tóxicas, diminuindo assim sua toxidez causada a planta, inclusive translocando-o menos para parte aérea (KOCHIAN, 1995; KOCHIAN; JONES, 1997; MATSUMOTO, 2000; MA; RYAN; DELHAIZE, 2001; BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002; MA; FURUKAWA, 2003). Ainda, mesmo com maior teor de  $Al^{3+}$  em suas raízes, o cultivar ANa 7007 foi capaz de obter maior crescimento radicular em comparação ao cultivar Maravilha (Tabela 30).

Por outro lado, não houve diferença entre os cultivares para acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea (Tabela 38). Isso se deu devido a maior produção de massa seca do cultivar ANa 7007 em comparação ao Maravilha. No entanto, houve diferença para acúmulo de  $Al^{3+}$  nas raízes dos cultivares, onde o cultivar Maravilha acumulou maior quantidade de  $Al^{3+}$  em comparação ao ANa 7007 (Tabela 38). Levando em consideração que o cultivar ANa 7007 obteve maior teor de  $Al^{3+}$  na raiz, pode-se creditar o maior acúmulo observado no cultivar Maravilha a dois fatores, o primeiro sendo a menor produção de massa de raiz do cultivar Maravilha (Tabela 29), e, segundo, maior suscetibilidade comprovada no presente experimento do cultivar Maravilha, fazendo com que o cultivar em questão acumule maior quantidade de  $Al^{3+}$  em suas raízes.

Para eficiência de absorção de macro e micronutrientes o comportamento é o mesmo para o já discutido anteriormente (Tabela 39). Quanto menor o valor, mais eficiente a planta em absorver determinado nutriente, sendo assim, verifica-se a alta eficiência da planta em absorver nutrientes nas combinações que não há  $Al^{3+}$ . Destaca-se a baixa eficiência de absorção de Si pela planta na combinação Si e  $Al^{3+}$ , no entanto, vale ressaltar que para essa combinação, houve baixo comprimento radicular e alto acúmulo de Si na parte aérea, gerando o alto valor verificado.

Encontra-se na Tabela 40 os parâmetros cinéticos  $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{mim}$  de absorção de Si e  $Al^{3+}$  por plantas de arroz de terras altas. Houve diferença entre os tratamentos para valores de  $C_{mim}$  de Si, os tratamentos de crescimento sem  $Al^{3+}$  obtiveram menores valores, isso é desejável, pelo fato de que quanto menor o  $C_{mim}$ , menor será concentração do elemento em solução necessária para absorção deste, ou seja, é a concentração limite abaixo da qual a planta é incapaz de absorver o elemento (BARBER, 1984). Ainda, para que o esgotamento se inicie, é essencial que a planta cultivada

apresente  $C_{min}$  inferior à concentração de Si na solução nutritiva (NOVAIS; SMYTH, 1999).

**Tabela 39.** Média de eficiência de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	mg vaso <sup>-1</sup>					
0 Si e $Al^{3+}$	0,36b	0,01b	0,33b	0,05b	0,02b	0,02b
1,7 Si	0,38b	0,01b	0,36b	0,05b	0,02b	0,02b
1,4 $Al^{3+}$	1,01a	0,05a	0,91a	0,10a	0,03a	0,06a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	1,05a	0,05a	0,98a	0,10a	0,03a	0,06a
CV(%)	23,8	27,0	25,1	21,8	20,8	24,6
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	μg vaso <sup>-1</sup>					mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	0,3b	0,1b	2,3b	2,5b	0,3b	0,09d
1,7 Si	0,3b	0,1b	2,1b	2,3b	0,3b	0,40b
1,4 $Al^{3+}$	1,0a	0,4a	4,1a	6,7a	0,6a	0,28c
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	0,8b	0,4a	3,6a	5,9a	0,6a	1,34a
CV(%)	28,7	39,0	21,0	22,1	28,4	21,5

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Por outro lado, os tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$ , obtiveram alto  $C_{min}$  (Tabela 40), dessa forma, é necessário maior concentração de Si na solução para que plantas submetidas ao estresse por  $Al^{3+}$  possam absorver. Em outras palavras, quando não há  $Al^{3+}$  na solução não é necessária alta disponibilidade de Si para que a planta possa absorver Si. Porém, na presença de  $Al^{3+}$ , a disponibilidade de Si na solução deve ser cerca de sete vezes maior para que ocorra absorção de Si. Isso provavelmente ocorreu pois o  $Al^{3+}$  influenciou de forma negativa o comprimento, superfície e diâmetro radicular dos tratamentos em questão (Tabela 30), aumentando o  $C_{mim}$ .

Os tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$  obtiveram valores superiores de  $K_m$  de Si. O  $K_m$  demonstra a afinidade dos transportadores pelo íon estudado, quanto menor o valor, maior afinidade o transportador tem (BARBER, 1984). Dessa forma, transportadores de raízes crescidas sem  $Al^{3+}$  tem maior afinidade pelo íon Si em comparação as raízes em contato com  $Al^{3+}$  durante seu crescimento. Pode ser que o  $Al^{3+}$  tenha causado dano as proteínas transportadoras, e por isso verificou-se maior  $K_m$  para tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$ . Ainda, assim como ocorreu para  $C_{mim}$ , o menor

crescimento radicular nos tratamentos onde havia  $Al^{3+}$  (Tabela 30), pode ter contribuído para maiores valores de Km nesses tratamentos.

**Tabela 40.** Média dos parâmetros cinéticos (Vmax, Km e Cmin) da absorção de silício e alumínio de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

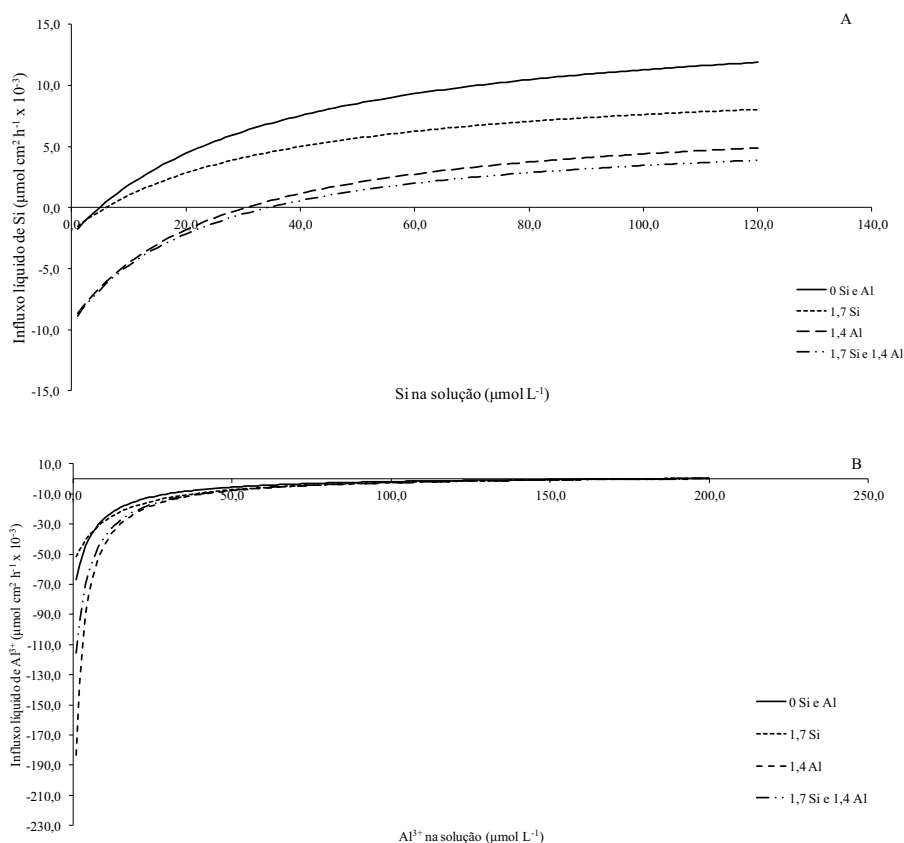
Combinações	Cmim Si	Km Si	Vmax Si	Cmim Al	Km Al	Vmax Al
	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol cm}^{-2}$ $\text{h}^{-1} \times 10^{-3}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol cm}^{-2}$ $\text{h}^{-1} \times 10^{-3}$
0 Si e $Al^{3+}$	4,3c	39,1b	15,9a	178,7b	184,4b	2,3b
1,7 Si	5,3c	39,8b	10,8b	179,3b	190,6a	3,3a
1,4 $Al^{3+}$	29,8b	56,2a	7,9c	186,9a	189,5a	2,9a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	33,7a	57,7a	6,4c	186,6a	191,0a	2,9a
-----						
Cultivares						
Maravilha	19,1a	49,1	9,1b	183,4	189,9	3,1a
ANA7007	17,5b	47,3	11,5a	182,4	187,8	2,6b
CV(%)	8,3	7,9	15,7	1,85	2,62	21,9

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Acompanhando Cmim e Km para Si, os tratamentos cultivados sem a presença de  $Al^{3+}$  também obtiveram valores superiores de Vmax para Si em comparação aos tratamentos cultivados com  $Al^{3+}$ , ou seja, apresentaram maior absorção de Si. Deve-se destacar que o tratamento que foi cultivado sem Si obteve maior Vmax de Si em comparação ao tratamento cultivado com 1,7 mmol de Si. Isso pode ter ocorrido, devido ao fato de que a planta quando é cultivada sem determinado nutriente disponível para absorção, quando este é fornecido, a planta garante que ocorra rápida absorção, aumentando seu Vmax (SHIMOGAWARA; USUDA, 1995).

Com o auxílio da taxa de influxo líquido de Si estimada (Figura 21A) é possível confirmar a maior absorção de Si nos tratamentos cultivados sem a presença de  $Al^{3+}$ , em especial no tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$ , enquanto o efluxo de Si foi baixo para esses tratamentos. Por outro lado, há maior efluxo de Si em tratamentos crescidos com  $Al^{3+}$ , portanto, isto indica que existe menor absorção de Si por estas plantas (Figura 21A).

O efeito do  $Al^{3+}$  na absorção de Si ocorreu principalmente devido ao dano estrutural causado pelo  $Al^{3+}$  nas raízes (Figura 19B e E). Em consequência a esses danos, houve influência negativa no Cmim, Km e Vmax de Si das plantas, ou seja, decréscimo da absorção de Si pelas plantas de arroz de terras altas. Ainda, o dano estrutural também influencia negativamente na absorção de água e nutrientes pelas raízes (Tabela 35 e 37) (MISTRO et al., 2001; MENDONÇA et al., 2003; WANG et al., 2006).



**Figura 21.** Taxas de influxo líquido de silício (A) e alumínio (B), estimadas de acordo com concentração de silício e alumínio na solução nutritiva sob cultivo de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos)

Além dos danos estruturais observados via microscópio, sabe-se que a toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  está ligada a mudanças na homeostase celular do cálcio e no bloqueio de canais na membrana plasmática (JONES et al., 1998). O  $\text{Al}^{3+}$  altera, ainda, a permeabilidade da membrana plasmática (AHN et al., 2001; KOCHIAN, 1995; YAMAMOTO et al., 2001). Seus efeitos são causados por mudanças na fluidez dos lipídios, resultantes da ligação eletrostáticas de espécies catiônicas de  $\text{Al}^{3+}$  a regiões polares dos fosfatidilcolina (RENGEL, 1996; JUSTINO et al., 2006). Portanto, pode haver passagem de íons tanto para o interior da planta, quanto para seu exterior.

O comportamento observado no presente experimento se assemelha aos obtidos por Pereira et al. (2008), que citam que o  $\text{Al}^{3+}$  modifica as constantes cinéticas da absorção de P por raízes de plantas de sorgo, reduzindo a absorção de P.

É importante comentar que o decréscimo da absorção de Si causado pelo  $\text{Al}^{3+}$ , pode ser um efeito importante para plantas de arroz de terras altas, devido ao

fato de serem plantas acumuladoras de Si e este exercer um papel importante no crescimento da planta, em especial sob estresse, seja ele qual for. Por outro lado, observou-se no tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$ , que mesmo obtendo parâmetros cinéticos de Si semelhantes aos obtidos pelo tratamento 1,4  $Al^{3+}$  (Tabela 40), foi capaz de amenizar a toxidez causada por  $Al^{3+}$  nas plantas (Tabela 29). Além disso, mesmo com a interferência negativa do  $Al^{3+}$  na absorção de Si em plantas do tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$ , estas foram capazes de manter os mesmos teores e acúmulos de Si da parte aérea e raiz em comparação ao tratamento 1,7 Si (Tabela 34, 35 e 36). Dessa forma, pode haver algum mecanismo em que a planta ajusta sua absorção de Si, se adaptando ao estresse e absorvendo este em maior quantidade.

Quanto aos parâmetros cinéticos para absorção de  $Al^{3+}$  em plantas de arroz (Tabela 40), os tratamentos cultivados sem  $Al^{3+}$  obtiveram menor  $C_{mim}$  para absorção de  $Al^{3+}$  em comparação aos tratamentos com  $Al^{3+}$ , porque as raízes destes estavam intactas, e aptas para absorção inclusive de  $Al^{3+}$ . Ou seja, para esses tratamentos foi necessário menor concentração de  $Al^{3+}$  para sua absorção e por consequência causar toxidez.

O tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  obteve menor valor de  $K_m$  para absorção de  $Al^{3+}$ , isso mostra que as plantas desse tratamento tiveram maior afinidade pela absorção de  $Al^{3+}$ . No entanto, apesar de maior afinidade o tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  obteve o menor  $V_{max}$  entre os tratamentos para absorção de  $Al^{3+}$ . Isso pode levantar a hipótese de que a planta não absorve necessariamente o  $Al^{3+}$ , o que pode ser observado na Figura 21B, onde o influxo líquido para absorção de  $Al^{3+}$  por plantas de arroz praticamente não ultrapassa 0, sendo a absorção mínima, ocorrendo basicamente efluxo.

Ainda, nesse sentido, é necessário levar em consideração que plantas de arroz no tratamento 1,4  $Al^{3+}$  acumulou 11,46 mg de  $Al^{3+}$  na massa seca total (Raiz + parte aérea) (Tabela 38), ao se comparar esse valor acumulado com a concentração aplicada de  $Al^{3+}$  durante o crescimento das plantas ( $1480 \mu\text{mol L}^{-1}$ ), pode-se inferir que a quantidade acumulada é insignificante. Portanto, apesar da planta absorver  $Al^{3+}$ , é possível que a toxidez causada pelo  $Al^{3+}$  é diretamente causada as raízes.

Outra hipótese que pode ser levantada, é de que as plantas do tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  estavam com seus mecanismos de tolerância ao  $Al^{3+}$  intactos, uma vez que não foram cultivadas na presença de  $Al^{3+}$ , dessa forma, houve impedimento da absorção deste. Esta que é uma das formas de tolerância das plantas ao  $Al^{3+}$  (KOCHIAN et

al., 2004). Isso pode ter ocorrido inclusive no cultivar suscetível, devido a baixa concentração de  $Al^{3+}$  utilizada no experimento de exaustão e o baixo tempo de contato do  $Al^{3+}$  com as plantas.

Esperava-se que no tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  houvesse menor  $V_{max}$  para  $Al^{3+}$ , ou seja, menor absorção de  $Al^{3+}$ , sendo beneficiada pela amenização da toxidez mediada pelo Si, no entanto, não foi o verificado. Ainda, é clara a ação deletéria do  $Al^{3+}$  sob o crescimento radicular (Tabela 30) e cinética de absorção de Si (Tabela 40), no entanto, o Si não interfere ou pouco interfere no crescimento radicular e na absorção de  $Al^{3+}$ . Dessa forma, esse comportamento suporta a hipótese de que a amenização da toxidez por  $Al^{3+}$  mediada pelo Si, observada especialmente devido a maior produção de massa seca da parte aérea (Tabela 29), ocorre no interior da planta.

Existem duas hipóteses na literatura para a amenização do  $Al^{3+}$  por Si, a primeira é que essa interação ocorre no interior da planta (GALVEZ; CLARK, 1991; HODSON; SANGSTER, 1993; HODSON; EVANS, 1995; CORRALES et al., 1997; COCKER et al., 1998; MA et al., 2001; NEUMANN; NIEDEN, 2001; KIDD et al., 2001; LIANG et al., 2007), esta que considera-se que ocorreu no presente trabalho; a segunda é que a interação ocorre na solução do solo (MA et al., 1997), tornando o  $Al^{3+}$  tóxico complexado em formas não tóxicas. Esta última hipótese pode ser excluída como causa de algum resultado no presente trabalho, isto porque após todas as soluções com Si e  $Al^{3+}$  serem preparadas, foram analisadas quanto aos seus teores de Si e  $Al^{3+}$  e as concentrações mensuradas estavam de acordo com as previamente adicionadas, presumindo que não houve interação entre esses elementos na solução nutritiva.

Houve menor teor de compostos fenólicos solúveis na parte aérea de plantas de arroz de terras altas quando na presença de Si e submetidas a estresse por  $Al^{3+}$  (Tabela 41), em comparação com o tratamento somente  $Al^{3+}$ . Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Mengel e Kirkby (1987) e Epstein (1999), os quais sugerem que o Si exerce influência sob a concentração de compostos fenólicos na planta.

Dessa forma, isso pode contribuir para explicar por que ocorreu maior produção de massa seca de parte aérea do mesmo tratamento (Tabela 29), uma vez que os compostos fenólicos podem ser considerados indicativos de estresse, ou seja, onde há em maior concentração, a planta está sob maior estresse (SASAKI et al., 1996). Pode ser que o menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea mediado pela presença de Si

observada no mesmo tratamento (Tabela 38) seja a explicação da menor concentração de compostos fenólicos.

**Tabela 41.** Média do teor de compostos fenólicos solúveis e acúmulo de lignina na parte aérea e raiz de de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANA 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Teor de compostos fenólicos solúveis		Acúmulo de lignina	
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz
	-----g 100 g <sup>-1</sup> -----		-----%------	
0 Si e $Al^{3+}$	0,8a	0,32c	4,8a	7,9b
1,7 Si	0,7b	0,34bc	4,1b	9,2a
1,4 $Al^{3+}$	0,8a	0,37b	4,0b	7,6b
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	0,7b	0,40a	3,1c	7,6b
-----				
Cultivares				
Maravilha	0,8a	0,36	4,2a	7,2b
ANA7007	0,7b	0,36	3,8b	8,9a
CV(%)	4,3	6,7	7,8	6,6

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Por outro lado, o menor teor de compostos fenólicos pode ser apenas um indicativo, e não a causa de maior produção de massa seca, ou seja, havia menor teor de compostos fenólicos indicando assim que havia menos estresse no referido tratamento, no entanto, não necessariamente a maior concentração desses compostos contribuiu para maior produção de massa seca.

O teor de compostos fenólicos nas raízes obteve comportamento oposto (Tabela 41), onde, houve maior teor no tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$ . Isso pode ser explicado devido as raízes serem o alvo primário do  $Al^{3+}$ , sendo o maior dano observado nessa parte da planta. E como observado em outras variáveis o Si não contribuiu para melhoria do crescimento radicular sob estresse por  $Al^{3+}$ . Dessa forma, novamente apoia-se a hipótese de que o efeito amenizador do Si ocorra no interior da planta, especialmente na parte aérea.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Peixoto et al. (2007), que observaram maior produção de compostos fenólicos em raízes de plantas de sorgo sob estresse por  $Al^{3+}$  em comparação com plantas sem estresse.

Ao comparar os cultivares quanto ao teor de compostos fenólicos na parte aérea (Tabela 41), observa-se que o cultivar tolerante obteve menor teor em comparação ao suscetível ao  $Al^{3+}$ . Comprovando mais uma vez sua tolerância ao  $Al^{3+}$ , já



que os compostos fenólicos são indicativos de estresse, dessa forma, ao passo que quanto menor o teor destes compostos, menos estressada a planta está.

Quanto ao acúmulo de lignina na parte aérea (Tabela 41), houve maior acúmulo no tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$ , seguidos pelos tratamentos 1,4  $Al^{3+}$  e 1,7 Si. O menor acúmulo foi verificado no tratamento 1,7 Si + 1,4  $Al^{3+}$ , sendo assim, o Si não foi capaz de aumentar o acúmulo de lignina na parte aérea de plantas sob estresse. Da mesma forma ocorreu para as raízes, os tratamentos onde havia  $Al^{3+}$ , obtiveram menor acúmulo de lignina em comparação aos tratamentos crescidos sem este elemento tóxico (Tabela 41). Mais uma vez demonstrando o não efeito amenizador de Si em raízes.

A lignina está ligada a rigidez das células e tecidos e por consequência a resistência a estresses (RAES et al., 2003; CABANÉ et al., 2004; TAIZ; ZEIGER, 2009). Este composto contribui para a redução dos danos causados pelo  $Al^{3+}$ , porque sua deposição em plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  ocorre nas células referentes a zona de alongamento, dessa forma, Sasaki et al. (1996) e Barceló e Poschenrieder (2002) sugerem que esse processo pode contribuir indiretamente para reduzir os danos causados pelo  $Al^{3+}$  às membranas celulares.

Ainda, esperava-se que os tratamentos cultivados na presença de Si apresentassem maior teor de lignina, pelo fato de que segundo Mengel e Kirkby (1987) o Si pode exercer função bioquímica em plantas, a qual pode estar relacionada à síntese de lignina. E ainda, Epstein (1999) sugere que o Si pode influenciar o mecanismo de defesa da planta, acumulando maior quantidade de lignina. No entanto, o acúmulo de lignina não foi beneficiado pelo Si nos tratamentos avaliados.

O não aumento do teor de lignina nos tratamentos cultivados com plantas sob estresse por  $Al^{3+}$ , também pode contribuir para explicar o não aumento da espessura radicular nos mesmos tratamentos avaliados em microscopia (Tabela 31). Devido ao fato de Vázquez et al. (1999) e Konarska (2005), atribuírem o aumento da espessura da parede celular a deposição de compostos químicos nas raízes, como lignina.

Com a aplicação de Si em plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  houve maior teor de celulose e FDA em comparação ao tratamento somente  $Al^{3+}$  (Tabela 42). Esse comportamento pode ser ligado a presença de Si, já que os tratamentos 1,7 Si + 1,4  $Al^{3+}$  e 1,7 Si foram semelhantes significativamente. Dessa forma, esse comportamento pode não ocorrer necessariamente em plantas sob estresse por  $Al^{3+}$ , e sim a presença de Si em solução que proporciona maior teor de celulose e FDA, independentemente das plantas

estarem ou não sob estresse. Esta que pode ser uma característica interessante para a planta, devido a celulose ser um composto bioquímico ligado a proteção contra estresse, no entanto, esse processo não é bem entendido, necessitando novos estudos na área.

Van Soest (1994) cita que o Si pode proporcionar arranjos diferenciados de fibrilas de celulose, dessa forma alterando seu teor na planta. Por outro lado, Silva et al. (2005) não observaram diferença para teor de celulose em palha de arroz com e sem aplicação de Si.

**Tabela 42.** Média do teor de celulose e FDA na parte aérea e raiz de linhagens de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Celulose		FDA	
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz
	-----%-----		-----%-----	
0 Si e $Al^{3+}$	28,2b	34,8a	35,5b	45,6a
1,7 Si	32,5a	34,8a	41,7a	46,5a
1,4 $Al^{3+}$	26,6b	28,4b	33,0b	38,8b
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	31,2a	30,2b	39,2a	39,7b
-----				
Cultivares				
Maravilha	31,1a	36,3a	39,4a	46,1a
ANA7007	28,2b	27,8b	35,2b	39,2b
CV(%)	8,2	8,6	7,0	6,33

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Verificou-se a existência ou não dos seguintes ácidos orgânicos na solução nutritiva coletadas antes da colheita das plantas de arroz de terras altas: ácido acético, propiônico, butírico, málico, tartárico, oxálico e cítrico. Destes apenas oxálico e tartárico foram detectados na solução onde foram cultivadas as plantas de arroz de terras altas (Tabela 43). Apesar de ter sido detectado, não foi possível quantificar o ácido tartárico na solução nutritiva. É possível que sua concentração estava abaixo do limite que o cromatógrafo pudesse detectar.

Nos tratamentos com a presença de  $Al^{3+}$  o teor de ácido oxálico na solução nutritiva foi maior, concordando com a hipótese de que plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  podem exsudar maior quantidade de ácidos orgânicos como forma de defesa (HUANG; VIOLANTE, 1986; MIYASAWA et al., 1992; MA et al., 2001; PIÑEROS et al., 2002 e MA et al., 2004). Ainda, de acordo com classificação postulada por Huang e Violante (1986) e Miyasawa et al. (1992) para eficiência dos ácidos orgânicos quanto sua

capacidade de complexação do  $Al^{3+}$ , o ácido oxálico tem alta eficiência na complexação deste.

**Tabela 43.** Média do teor ácidos orgânicos identificados na solução nutritiva antes da colheita de cultivares de arroz de terras altas (Maravilha – suscetível ao  $Al^{3+}$  e ANa 7007 – tolerante ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Ácido Oxálico mg L <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	18,9b
1,7 Si	19,4b
1,4 $Al^{3+}$	27,8a
1,7 Si e 1,4 $Al^{3+}$	28,0a
-----	
Cultivares	
Maravilha	24,1
ANA7007	23,0
CV(%)	6,4

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

A maior presença de ácido oxálico pode ser explicada devido a exsudação deste estar envolvida em mecanismos de tolerância da planta ao  $Al^{3+}$ . Neste mecanismo, na presença de  $Al^{3+}$ , as raízes podem ativar a exsudação de ácidos orgânicos como malato, citrato e oxalato, que complexam (quelatiza) o  $Al^{3+}$ , impedindo que este chegue aos seus sítios de toxicidade nas plantas. Impedindo assim sua absorção, por consequência evitando interação com componentes celulares e penetração no simplasto radicular (ABICHEQUER et al., 2003; MARIANO et al., 2005; FERNANDES, 2006).

Sabe-se que os ácidos orgânicos contribuem para complexação do  $Al^{3+}$  devido a formação de quelatos, modificando a forma química do  $Al^{3+}$  e transformando-o em composto menos tóxico (MA et al., 2001). No entanto, é importante salientar, que o papel destes na neutralização do  $Al^{3+}$ , ainda não é bem entendido.

Ainda, não é possível dizer se o ácido orgânico identificado está ou não ligado ao íon  $Al^{3+}$ , diminuindo sua atividade. Salienta-se de que talvez se estiver fazendo ligações com  $Al^{3+}$  pode ser que o método empregado não seja capaz de identificar o ácido orgânico apropriadamente.

#### 6.4.1. Considerações finais

O Si ameniza a toxidez causada por  $Al^{3+}$  em plantas de arroz, porque houve maior produção de massa seca da parte aérea e altura de plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas crescidas somente na presença de  $Al^{3+}$ .

O Si não alterou nenhum parâmetro radicular (WinRhizo) de plantas de arroz expostas a toxidez por  $Al^{3+}$ .

Houve maior ação tóxica do  $Al^{3+}$  em raízes finas de plantas de arroz.

Apesar de maior diâmetro verificado nos tratamentos crescidos na presença de  $Al^{3+}$  mensurados em software (WinRhizo), não houve diferença entre os tratamentos para diâmetro radicular mensurado em microscópio.

Raízes sob toxidez por  $Al^{3+}$  sofreram danos celulares, enquanto raízes que cresceram sem  $Al^{3+}$  estavam intactas.

Devido a ação tóxica do  $Al^{3+}$  a zona meristemática de raízes cultivadas sob esse elemento levaram maior tempo para se diferenciarem, dano este, característico de toxidez por  $Al^{3+}$ .

O cultivar tolerante ao  $Al^{3+}$  obteve maior número de elementos de vaso.

Não houve diferença visual entre a coloração com hematoxilina férrica dos meristemas apicais dos tratamentos. Portanto, a coloração das raízes não contribuiu para melhor visualização e diferenciação de tratamentos quanto ao dano do  $Al^{3+}$  no meristema apical das raízes de plantas de arroz.

Houve maior teor e acúmulo de Si na parte aérea de plantas de arroz no tratamento 1,7 Si + 1,4  $Al^{3+}$  em comparação ao tratamento 1,4  $Al^{3+}$ . Ainda, houve menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea de plantas de arroz que foram submetidas a estresse por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas que foram expostas somente ao  $Al^{3+}$ .

O Si não alterou o teor e acúmulo de macro e micronutrientes em plantas de arroz sob estresse por  $Al^{3+}$  em comparação a plantas crescidas somente na presença de  $Al^{3+}$ .

O  $Al^{3+}$  diminuiu a absorção ( $V_{max}$ ) de Si por plantas de arroz, efeito que pode ser danoso a plantas de arroz, já que são acumuladoras de Si.

O Si não diminuiu a absorção ( $V_{max}$ ) de  $Al^{3+}$  por plantas de arroz. Sugerindo assim, que o efeito benéfico do Si ocorre no interior da planta.

A taxa de influxo líquido de  $Al^{3+}$  demonstrou que plantas de arroz praticamente não absorvem  $Al^{3+}$ , sendo seu efeito tóxico provavelmente devido ao seu contato com as raízes.

Houve menor concentração de compostos fenólicos na parte aérea do tratamento Si e  $Al^{3+}$  em comparação ao tratamento somente  $Al^{3+}$ , isso significa, que a planta estava sob menor nível de estresse.

Detectou-se na solução nutritiva antes da colheita das plantas de arroz a presença de ácidos oxálico e tartárico, não sendo possível a quantificação do último. Houve maior produção de ácido oxálico por plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  em comparação a plantas de arroz sem estresse, independentemente da presença de Si.

### 6.5. Experimento 5: interação silício e alumínio em plantas de mamona (cultura não acumuladora de Si)

Basicamente, para altura de plantas, diâmetro de caule, número de folhas por planta e massa seca da parte aérea, raiz e total (Tabela 44), volume e diâmetro de raiz (Tabela 45), os tratamentos que foram cultivados sem  $Al^{3+}$  ou com Si obtiveram melhor desempenho em comparação aos tratamentos com  $Al^{3+}$ , sem influência do Si na amenização da toxidez causada por  $Al^{3+}$ . Não houve diferença entre as linhagens tolerante e suscetível para as variáveis acima citadas.

**Tabela 44.** Média de altura de plantas, diâmetro de caule, número de folhas por planta, produção de massa seca da parte aérea, raiz e total de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Altura de plantas	Diâmetro de caule	Número de folhas por planta	MS Parte aérea	MS Raiz	MS Total
	cm	mm	n <sup>o</sup>	-----g vaso <sup>-1</sup> -----		
0 Si e $Al^{3+}$	8,0	6,4ab	6,6a	8,9a	4,4a	13,3a
1,7 Si	7,5	6,7a	6,6a	9,0a	4,4a	13,4a
1,1 $Al^{3+}$	7,8	6,3b	5,6b	7,8b	3,5b	11,3b
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	7,8	6,3b	6,0b	7,7b	3,4b	11,1b
Linhagens						
CRZ 6	7,8	6,4	6,2	8,2	4,0	12,2
CRZ 18	7,7	6,4	6,2	8,5	3,8	12,4
CV(%)	9,6	6,5	8,3	9,0	11,8	9,4

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

De maneira geral, os tratamentos sem  $Al^{3+}$  apresentaram melhor crescimento radicular, área de superfície e volume radicular (Tabela 45). Ainda, o Si

contribuiu para maior comprimento radicular de raízes sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  em comparação ao tratamento 1,1  $\text{Al}^{3+}$ , no entanto, isso ocorreu somente para a linhagem CRZ 18, esta considerada suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 46). O Si contribuiu ainda, para maior área de superfície de raízes de plantas cultivadas sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  em comparação ao tratamento 1,1  $\text{Al}^{3+}$ , no entanto, assim como ocorreu para comprimento radicular, esse comportamento foi verificado somente na linhagem suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  (CRZ 18) (Tabela 46).

**Tabela 45.** Média de comprimento, área de superfície, volume e diâmetro médio radicular de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Comprimento de raiz	Área de superfície	Volume	Diâmetro médio
	m vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> vaso <sup>-1</sup>	mm
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	193,2a	4122,6a	70,2a	0,68a
1,7 Si	191,2a	4192,5a	73,6a	0,69a
1,1 $\text{Al}^{3+}$	111,6c	2213,0b	35,2b	0,63b
1,7 Si e 1,1 $\text{Al}^{3+}$	133,1b	2417,6b	38,1b	0,61c
-----				
Linhagens				
CRZ 6	168,3a	3431,9a	57,7a	0,65
CRZ 18	146,2b	3041,0b	50,8b	0,65
CV(%)	10,1	10,1	11,2	4,3

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 46.** Desdobramento de comprimento e área de superfície radicular de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Comprimento de raiz		Área de superfície	
	CRZ 6	CRZ 18	CRZ 6	CRZ 18
	m vaso <sup>-1</sup>	m vaso <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> vaso <sup>-1</sup>	mm
0 Si e $\text{Al}^{3+}$	212,5aA	173,9aB	4532,7aA	3712,6aB
1,7 Si	203,0aA	179,5aB	4403,9aA	3981,2aA
1,1 $\text{Al}^{3+}$	122,0bA	101,2cB	2385,7bA	2020,7cA
1,7 Si e 1,1 $\text{Al}^{3+}$	135,9bA	130,3bA	2405,4bA	2449,6bA

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas e minúsculas nas colunas diferem-se estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste t

As combinações 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  obtiveram menor diâmetro médio radicular em comparação aos tratamentos cultivados sem  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 45). Um dos danos causados pelo  $\text{Al}^{3+}$  nas raízes é o espessamento da parede radicular (KOCHIAN, 1995), no entanto, não foi o que ocorreu no presente experimento, porque os tratamentos com  $\text{Al}^{3+}$  obtiveram menores valores de diâmetro em comparação aos

tratamentos sem  $Al^{3+}$ . Observou-se visualmente que nos tratamentos crescidos com  $Al^{3+}$  havia a presença de raízes mortas, ligeiramente mais finas, talvez por isso, os tratamentos com  $Al^{3+}$  obtiveram menor diâmetro radicular.

Ao comparar as linhagens quanto aos parâmetros radiculares avaliados (Tabela 45), observa-se que a CRZ 06 obteve maior comprimento, área de superfície e volume radicular e ainda, crescimento de raízes finas, médias e grossas em comparação a linhagem CRZ 18. Dessa forma, confirma-se a seleção das linhagens, a primeira como tolerante e a segunda suscetível ao  $Al^{3+}$ .

O Si contribuiu para maior comprimento de raízes finas e grossas em plantas sob estresse por  $Al^{3+}$  em comparação ao tratamento 1,1  $Al^{3+}$  de ambos cultivares (Tabela 47). Talvez, dessa forma, o maior comprimento de raízes finas e grossas na combinação 1,7 Si + 1,1  $Al^{3+}$  pode contribuir para explicar o maior comprimento radicular total obtido na mesma combinação, especialmente para a linhagem CRZ 18 (Tabela 46).

**Tabela 47.** Média de comprimento radicular dentro de classes de diâmetro (finas, médias e grossas) de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Finas	Médias	Grossas
	-----m-----		
0 Si e $Al^{3+}$	107,1a	61,0a	25,1a
1,7 Si	104,3a	60,0a	26,8a
1,1 $Al^{3+}$	64,8c	36,6b	10,0c
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	84,9b	35,3b	12,9b
-----			
Linhagens			
CRZ 6	97,9a	50,2a	20,1a
CRZ 18	82,7b	46,2b	17,3b
CV(%)	6,8	10,5	12,1

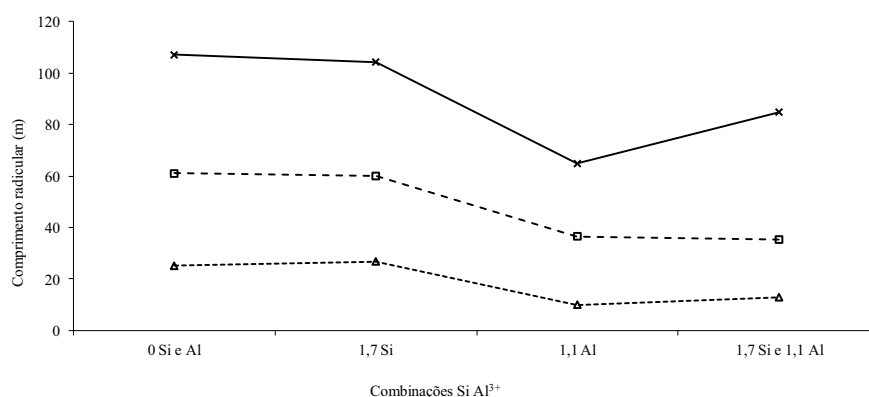
Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Dessa forma, devido ao fato de o Si proporcionar maior crescimento radicular, especialmente raízes finas e grossas em plantas de mamona sob estresse por  $Al^{3+}$ , pode-se considerar esse efeito benefício, mediado pelo Si. Pode ser que o benefício mediado pelo Si, melhorando o crescimento "global" da planta sob estresse por  $Al^{3+}$  ocorra de forma mais evidente em plantas acumuladoras de Si como o arroz (Experimento 4), influenciando especialmente produção de massa seca (Tabela 29). No entanto, destaca-se a importância do crescimento radicular (Tabela 45), uma vez que

quanto maior o crescimento desta, maior capacidade de absorção de água e nutrientes, especialmente as raízes finas (ZONTA et al., 2006). No entanto, não se observou maior crescimento e desenvolvimento da planta (Tabela 44).

Estes resultados corroboram os obtidos por Zsoldos et al. (2003), que observaram maior crescimento radicular de plantas de trigo sob estresse por  $Al^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas cultivadas somente com  $Al^{3+}$ .

Houve maior dano causado por  $Al^{3+}$  em raízes finas em comparação a raízes médias e grossas (Tabela 47 e Figura 22). O decréscimo do comprimento de raízes finas na presença de  $Al^{3+}$  foi de cerca de 40 m em comparação ao cultivo sem  $Al^{3+}$ , enquanto para raízes médias e grossas o decréscimo foi de 24 e 14 m, respectivamente.



**Figura 22.** Ilustração da diferença de comprimento radicular nas classes de diâmetros, finas (x), médias (□) e grossas (Δ) de linhagens de mamonas (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Não houve diferença entre tratamentos para diâmetro de raiz, espessura de parede de xilema e número de elementos de vaso mensurados em microscópio (Tabela 48). Esperava-se maior diâmetro radicular para tratamentos com  $Al^{3+}$ , no entanto, não foi observado, pelo menos em observações feitas em microscópio. Pode ser que o  $Al^{3+}$  tenha somente inibido o crescimento radicular e não alterando a espessura das raízes de plantas de mamona.

Encontra-se nas Figuras 23 e 24 as imagens dos cortes anatómicos de raízes de mamona, transversal e longitudinal, respectivamente. De forma geral, com base na descrição visual das secções transversais e longitudinais das raízes verificou-se que nas plantas de mamona mantidas como controle, a organização interna das raízes em



estrutura primária foi similar entre o cultivar tolerante (Figura 23A) e o cultivar suscetível ao alumínio (Figura 23B).

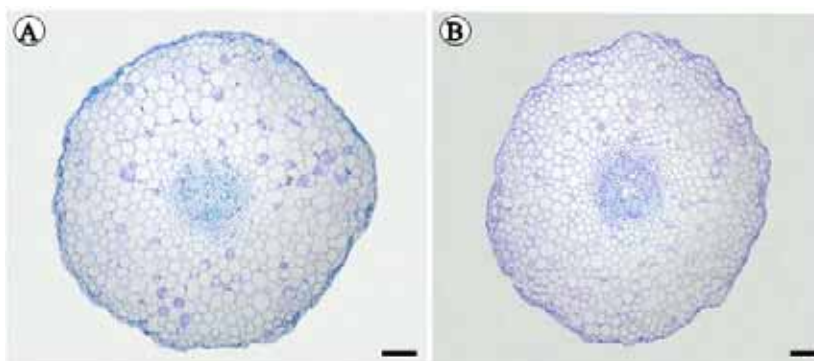
**Tabela 48.** Média de diâmetro, espessura de cortex, espessura por xilema e número de elemento de vaso em raízes (microscopia eletrônica) de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Diâmetro de Raiz	Espessura de cortex	Espessura parede xilema	Número elemento de vaso
	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	-
0 Si e $Al^{3+}$	1590,8	649,6a	2,3	4
1,7 Si	1483,3	554,8b	2,7	4
1,1 $Al^{3+}$	1389,7	526,2b	2,8	4
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	1543,0	600,5ab	2,8	4
-----				
Linhagens				
CRZ 6	1538,6	618,7a	2,6	4
CRZ 18	1464,8	546,8b	2,7	4
CV(%)	10,8	13,3	16,8	-

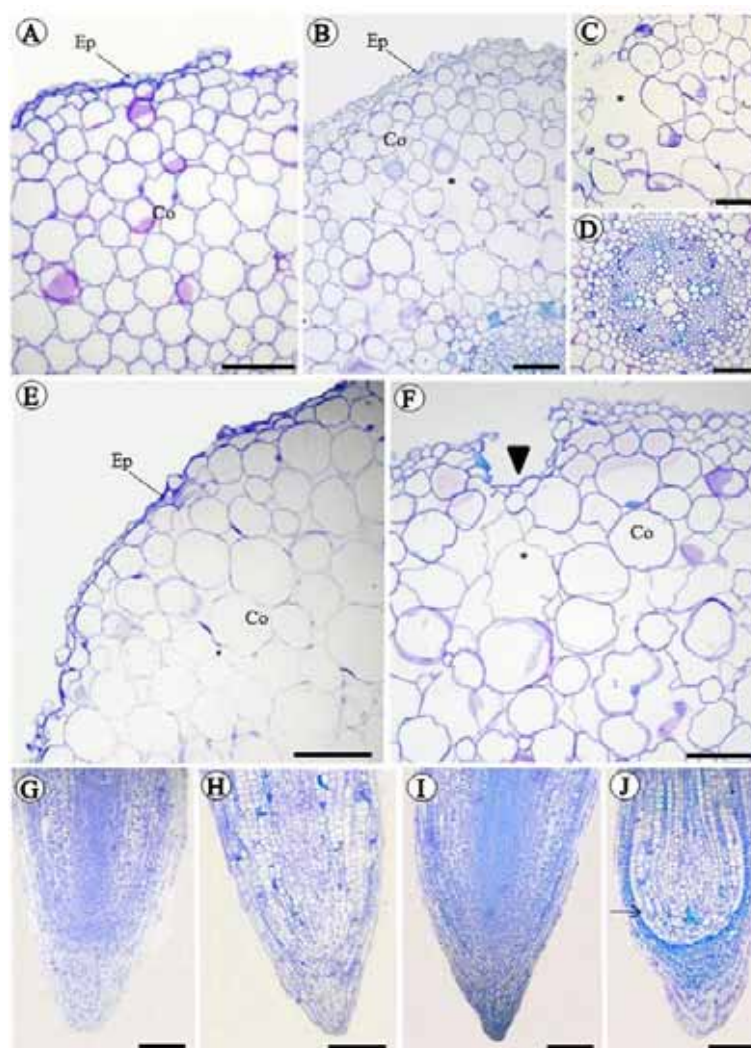
Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Em secção transversal de ambos os cultivares, a epiderme é uniestratificada composta por células justapostas com diferentes formatos variando de arredondado a retangular, além de pelos absorventes (Figura 23A, B, E e F). O córtex é formado por células de parênquima fundamental com espaços intercelulares conspícuos (Figura 23A, C, E e F); não foram observados espessamentos de parede nas células corticais mais externas; na região mais interna do córtex, são observadas cerca de três camadas de células parenquimáticas menos volumosas e justapostas (Figura 23B e D); as células da endoderme apresentam estrias de Caspary, entretanto, não foram observados espessamentos adicionais de parede, independente do cultivar (Figura 23D).

Em plantas submetidas ao alumínio e ao tratamento com Si e  $Al^{3+}$  ocorreu o rompimento de células epidérmicas e do parênquima, principalmente na região mais externa do córtex, tanto nas plantas tolerantes (Figura 23C) como nas sensíveis (Figura 23F). O rompimento de células representa a desintegração do órgão, o que pode levar a perda de função desta estrutura (BENNET; BREEN, 1991; ELEFTHERIOU et al., 1993).



**Figura 23.** Secções transversais da raiz de mamona em estrutura primária. Linhagem tolerante ao alumínio (A); Linhagem suscetível ao alumínio (B). Barras: 100  $\mu\text{m}$



**Figura 24.** Secções transversais (A-F) e longitudinais (G-J) de raízes de mamona a combinações de silício e alumínio. Linhagem tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (A). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (B). 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (C). Cilindro vascular no tratamento 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (D). Linhagem suscetível ao alumínio (E-F). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (E). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (F). Linhagem tolerante ao alumínio (G-H). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (G). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (H). Linhagem suscetível ao alumínio (I-J). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (I). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (J). Co: córtex; Ep: epiderme; \*: células colapsadas no córtex; ponta de seta indica região colapsada da epiderme; seta indica região abaulada do ápice radicular. Barras: A-F = 100  $\mu\text{m}$ , G-J 150  $\mu\text{m}$

Estes resultados corroboram Peixoto et al. (2007), que também observaram rompimento de tecidos da epiderme e de porções externas do córtex nos ápices de raízes de sorgo.

No entanto, ao contrário do que foi observado no experimento 4 (arroz), não foi verificado nenhum benefício do Si sob características morfológicas de raízes de mamona sob estresse por  $Al^{3+}$ .

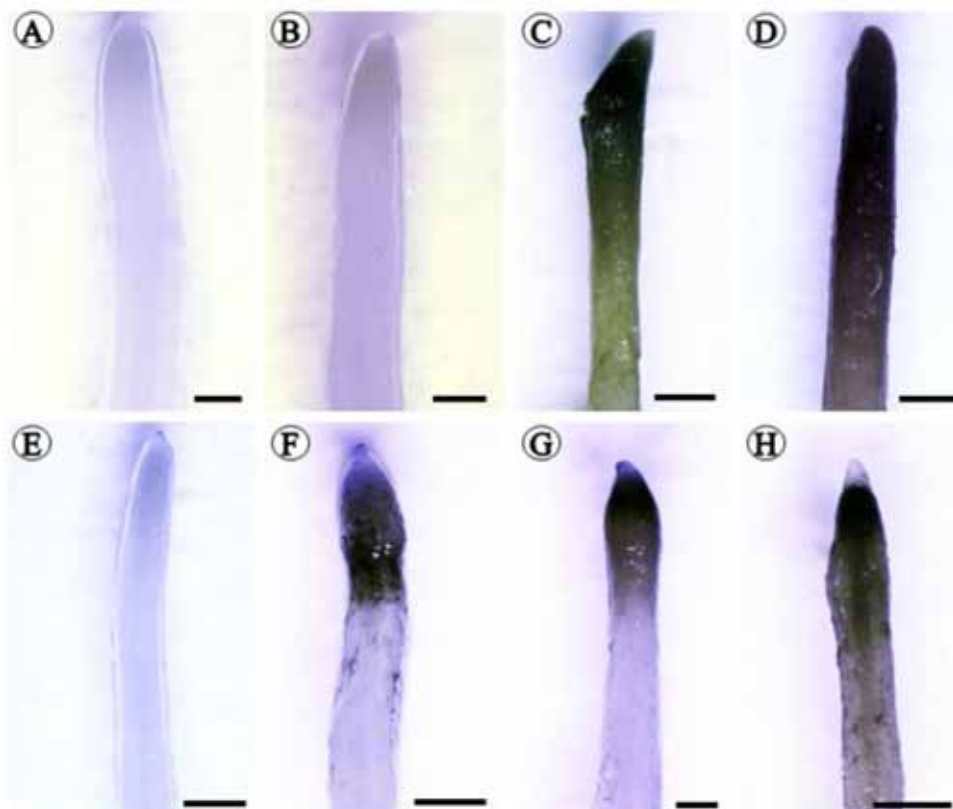
Em todos os materiais analisados, o cilindro vascular é tetrarco e constituído por periciclo e floema e xilema primários bem diferenciados (Figura 23A, B e 24D). Em secções longitudinais da região apical da raiz de plantas submetidas ao alumínio é possível observar que a diferenciação dos tecidos primários ocorre em região mais distante do ápice, em ambos os cultivares (Figura 24H e J), em relação ao tratamento controle (Figura 2G e I). Ainda, no cultivar suscetível ao alumínio foi observado maior abaulamento na região apical da raiz (Figura 24J).

Assim como ocorreu no experimento 4 (arroz), confirma-se o dano causado pelo  $Al^{3+}$ , devido a maior distância com que ocorre a diferenciação dos tecidos primários no ápice radicular. Levando maior tempo para ocorrer a diferenciação do meristema e diminuindo o crescimento radicular como um todo.

A coloração de raízes com hematoxilina férrica demonstrou diferenças visuais entre os tratamentos (Figura 25). Não houve dano ao meristema apical radicular de raízes referentes ao tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  de ambas linhagens. Por outro lado houve dano ao mesmo, em tratamentos com  $Al^{3+}$  nas duas linhagens, indiferentemente se tolerante ou suscetível ao  $Al^{3+}$  e presença ou não de Si.

Os resultados estão de acordo com os obtidos por Doncheva et al. (2005) e Ribeiro (2011), os quais observaram diferença na coloração dos ápices radiculares de plantas tratadas com hematoxilina, que sob estresse por  $Al^{3+}$  apresentaram coloração mais escura do que o cultivo sem estresse.

Ainda, houve dano ao meristema apical das raízes no tratamento 1,7 Si da linhagem suscetível ao  $Al^{3+}$ , comportamento este que não era esperado, uma vez que o Si não é tóxico às plantas. Pode ser que o pH 4,0 (ácido) para esse cultivar tenha causado o dano observado, no entanto, não há como garantir, ao passo que essas são observações visuais, as quais não são utilizadas repetições.



**Figura 25.** Morfologia externa da raiz de mamona cultivada em solução nutritiva e tratada com hematoxilina fêrrica. Linhagem tolerante ao alumínio (A-D). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (A). 1,7 Si (B). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (C). 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (D); Linhagem suscetível ao alumínio (E-H). 0 Si e  $\text{Al}^{3+}$  (E). 1,7 Si (F). 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (G). 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  (H). Barras: 0,5 mm

Acompanhando as variáveis já discutidas, para relação raiz - parte aérea, as combinações 0  $\text{Al}^{3+}$  e Si e 1,7 Si obtiveram maiores valores em comparação as combinações com  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 49). É interessante notar que não houve diferença entre os tratamentos 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$  e 1,1  $\text{Al}^{3+}$ . Ao comparar as linhagens, observa-se que a linhagem tolerante ao  $\text{Al}^{3+}$  apresentou maior relação raiz/parte aérea.

Para eficiência de utilização de Si, a combinação somente Si obteve a melhor eficiência (Tabela 49). Ao comparar os tratamentos 1,7 Si e o 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$ , verifica-se que o  $\text{Al}^{3+}$  prejudicou a eficiência na utilização de Si da planta, isso porque, o primeiro tratamento foi mais eficiente na utilização do Si.

Os teores de macro e micronutrientes da parte aérea acompanharam os resultados das variáveis anteriores, tendo as combinações cultivadas sem  $\text{Al}^{3+}$  com maiores valores (Tabela 50). No entanto, houve exceção para K, Mg, B, Cu e Zn, estes que não foram diferentes ao compará-los entre as combinações.

**Tabela 49.** Média de relação raiz/parte aérea e eficiência de utilização de silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Relação raiz - parte aérea	Eficiência de utilização de Si
	g mg <sup>-1</sup>	
0 Si e $Al^{3+}$	0,48a	0,13ab
1,7 Si	0,49a	0,11b
1,1 $Al^{3+}$	0,43b	0,14a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	0,44b	0,14a
-----		
Linhagens		
CRZ 6	0,49a	0,13
CRZ 18	0,43b	0,13
CV(%)	6,8	11,4

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 50.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg <sup>-1</sup>					
0 Si e $Al^{3+}$	35a	1,4a	18	11a	1,9	2,0a
1,7 Si	36a	1,3a	18	11a	1,9	1,9a
1,1 $Al^{3+}$	32b	1,0b	16	9b	1,7	1,9a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	32b	1,0b	16	8b	1,8	1,6b
CV(%)	4,3	7,3	9,1	5,5	6,7	7,3
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	mg kg <sup>-1</sup>					g kg <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	53	5	56ab	195a	25	7,6b
1,7 Si	56	5	58a	181a	24	8,6a
1,1 $Al^{3+}$	56	5	52b	145b	23	7,1bc
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	54	5	46c	128b	23	6,7c
CV(%)	8,6	7,4	7,7	11,8	9,2	10,9

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Os resultados de acúmulo de nutrientes na parte aérea (Tabela 51) e raiz (Tabela 53) comprovam os comportamentos anteriormente discutidos para as outras variáveis. Para todos os nutrientes, as combinações 0 Si e  $Al^{3+}$  e 1,7 Si obtiveram os maiores acúmulos de nutrientes, comprovando assim, o efeito danoso do  $Al^{3+}$  sob a absorção de nutrientes.

**Tabela 51.** Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na parte aérea de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $Al^{3+}$	328a	13,1a	170a	101a	18,1a	18,9a
1,7 Si	332a	12,7a	170a	100a	17,5a	17,6a
1,1 $Al^{3+}$	264b	8,2b	137b	71b	14,3b	15,4b
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	249b	7,7b	130b	63b	14,5b	12,9c
CV(%)	8,3	6,9	11,1	8,5	8,0	9,5
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μg vaso <sup>-1</sup> -----					mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	499a	51a	518a	1827a	233a	72,2a
1,7 Si	516a	49a	532a	1673a	225a	79,2a
1,1 $Al^{3+}$	449b	43b	425b	1173b	187b	56,3b
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	420b	41b	357c	982b	181b	52,6b
CV(%)	10,2	9,7	11,7	13,1	10,9	12,5

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Com relação aos teores de nutrientes na raiz (Tabela 52), o comportamento foi o mesmo que parte aérea, exceto N, P, B e Fe. Para N e Fe as combinações não foram diferentes entre si. O teor de P nas raízes foram maiores nas combinações que tinham  $Al^{3+}$  em sua composição, pode ter ocorrido efeito concentração, já que essas referidas combinações obtiveram menores produções de massa seca da raiz (Tabela 44). Isso pode ser confirmado ao analisar o acúmulo de P na raiz (Tabela 53), que não foi diferente entre as combinações.

**Tabela 52.** Média do teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $Al^{3+}$	32	2,0b	39a	5a	2,8a	1,8b
1,7 Si	32	2,0b	41a	5a	2,8a	2,0a
1,1 $Al^{3+}$	32	2,5a	28b	4b	1,6b	1,7c
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	32	2,5a	27b	4b	1,6b	1,7c
CV(%)	2,8	6,8	6,5	5,9	7,4	5,0
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----					g kg <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	58a	18a	40a	1894	91a	3,7c
1,7 Si	55ab	16ab	40a	1720	82a	4,5b
1,1 $Al^{3+}$	50b	14c	29b	1814	59b	4,2bc
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	58a	17bc	31b	1898	59b	5,8a
CV(%)	9,5	15,0	7,8	12,3	15,7	13,6

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 53.** Média do acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício na raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $Al^{3+}$	147a	9,3	180a	26a	13,0a	8,7a
1,7 Si	149a	9,4	189a	26a	12,9a	9,2a
1,1 $Al^{3+}$	117b	9,3	102b	17b	6,0b	6,5b
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	110b	8,7	92b	16b	5,7b	6,1b
CV(%)	9,1	9,7	11,1	10,0	9,9	10,5
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μg vaso <sup>-1</sup> -----					mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	266a	83a	185a	8676a	418a	17,5bc
1,7 Si	256a	77a	185a	7907a	379a	21,2a
1,1 $Al^{3+}$	183b	53b	108b	6636b	216b	15,6c
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	201b	51b	108b	6529b	200b	19,8ab
CV(%)	13,1	18,1	11,3	14,2	16,7	19,2

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

A combinação Si e  $Al^{3+}$  obteve o maior teor de B na raiz em comparação com a combinação somente  $Al^{3+}$  (Tabela 52), esse fato pode ter ocorrido devido a interação existente entre Si e B. Existem similaridades químicas entre ácido silícico e ácido bórico em solução, ainda, o B juntamente com o Ca, participa da síntese e estruturação da parede celular das células e que ambos apresentam demanda inversamente proporcional à capacidade de absorver Si (MARSCHNER, 1995).

Nota-se que a mamona é uma planta não acumuladora de Si, especialmente devido ao não aumento do acúmulo de Si da parte aérea no tratamento 1,7 Si, em comparação ao 0 Si e  $Al^{3+}$  (Tabela 51), que mesmo ao aplicar o elemento na solução, não houve aumento de seu acúmulo na parte aérea. Nos tratamentos com  $Al^{3+}$ , também não foram diferentes entre si. Mesmo com a presença de Si, este, não foi capaz de aumentar o acúmulo de Si na combinação 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$ , em comparação a combinação 1,1  $Al^{3+}$ .

Ainda, é possível confirmar que plantas de mamona não são acumuladoras de Si ao observar os teores de Si na parte aérea dos tratamentos que foram cultivados com esse elemento (Tabela 50). Os teores foram a baixo de 17 g kg<sup>-1</sup>, dessa forma, segundo Korndörfer et al. (1999) são classificadas como baixa acumuladoras de Si.

Apesar de não acumular Si na parte aérea, houve maior teor e acúmulo de Si na raiz de plantas cultivadas no tratamento 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  em comparação ao tratamento 1,1  $Al^{3+}$  (Tabela 53). Esse comportamento é curioso, levando em

consideração o resultado obtido para teor e acúmulo de Si na parte aérea (Tabela 51), e, que plantas de mamona não são acumuladoras de Si, e ao mesmo tempo, o Si é pouco acumulado no sistema radicular de plantas, seja ela acumuladora ou não acumuladora de Si.

Houve menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea de plantas de mamona sob estresse por  $Al^{3+}$  quando aplicou-se Si na solução e comparação com a combinação 1,1  $Al^{3+}$  (Tabela 54). Ou seja, mesmo não acumulando Si na parte aérea (Tabela 51), a planta de mamona, obteve menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea de plantas sob estresse quando há Si na solução. Isso pode ter ocorrido devido ao maior teor (Tabela 52) e acúmulo de Si nas raízes (Tabela 53), este que pode ter contribuído para transformar o  $Al^{3+}$  em formas não tóxicas a planta e ou interferido na translocação do  $Al^{3+}$  para a parte aérea. Sendo a ultima hipótese mais factível, devido ao teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na raiz não ter sido alterado pelo Si (Tabela 54).

**Tabela 54.** Média do teor e acúmulo de alumínio na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Parte aérea		Raiz	
	Teor de $Al^{3+}$ g kg <sup>-1</sup>	Acúmulo de $Al^{3+}$ mg vaso <sup>-1</sup>	Teor de $Al^{3+}$ g kg <sup>-1</sup>	Acúmulo de $Al^{3+}$ mg vaso <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	0,07b	0,6a	2,4b	11,2b
1,7 Si	0,07b	0,6a	2,5b	11,4b
1,1 $Al^{3+}$	0,08a	0,7a	5,4a	19,7a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	0,06b	0,5b	5,8a	20,3a
-----				
Linhagens				
CRZ 6	0,07	0,6	3,9	16,0
CRZ 18	0,07	0,6	4,1	15,4
CV(%)	16,9	19,7	18,1	22,8

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Assim, talvez por isso, as raízes de mamona do tratamento 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  obtiveram melhor desenvolvimento em comparação ao tratamento 1,1  $Al^{3+}$  (Tabela 45 e 46). Indicando que o Si pode contribuir para amenizar a toxidez causada por  $Al^{3+}$  em plantas de mamona. Ainda, assim como ocorreu para plantas de arroz de terras altas (experimento 4), sugere-se que o efeito benéfico do Si na amenização da toxidez por  $Al^{3+}$  em plantas de mamona ocorre no interior da planta, especificamente, diminuindo a translocação do  $Al^{3+}$  para parte aérea.



A eficiência de absorção de nutrientes obteve o mesmo comportamento já observado anteriormente para N, Mg, B, Cu e Zn, sendo as combinações sem  $Al^{3+}$  e Si e somente Si mais eficientes ao absorver os nutrientes citados (Tabela 55). Por outro lado, a combinação Si e  $Al^{3+}$  favoreceu melhor eficiência de absorção de S, Fe e Mn em comparação a combinação somente  $Al^{3+}$ . Isso pode ter ocorrido devido à interação que ocorre entre Si e Fe; Si e Mn (BARBOSA FILHO, 1987; GALVEZ et al., 1987; TAKAHASHI, 1995; SAVANT et al., 1997), que o Si favorece o melhor aproveitamento desses micronutrientes pela planta. E, sob condições de estresse, as interações em questão podem ter maior influência sob a planta.

**Tabela 55.** Média de eficiência de absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, manganês, ferro, zinco e silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----mg m <sup>-1</sup> -----					
0 Si e $Al^{3+}$	1,6b	0,06	0,87	0,50	0,09b	0,09b
1,7 Si	1,7b	0,06	0,87	0,51	0,08b	0,08b
1,1 $Al^{3+}$	2,1a	0,06	1,13	0,58	0,11a	0,12a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	1,8ab	0,05	0,98	0,47	0,10ab	0,09b
CV(%)	16,6	16,8	22,3	17,4	18,1	16,9
	B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si
	-----μg m <sup>-1</sup> -----					mg m <sup>-1</sup>
0 Si e $Al^{3+}$	2,5b	0,2b	2,6b	9,3a	1,2b	0,37
1,7 Si	2,6b	0,2b	2,7b	8,5ab	1,1b	0,40
1,1 $Al^{3+}$	3,6a	0,3a	3,5a	9,6a	1,5a	0,46
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	3,1ab	0,3ab	2,6b	7,2b	1,3ab	0,39
CV(%)	19,5	18,0	16,8	18,7	20,6	21,5

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Apesar da melhor eficiência de absorção de Fe e Mn, de maneira geral, o Si não contribuiu para aumentar o teor e acúmulo de macro e micronutrientes, tanto para parte aérea como para raiz das plantas de mamona de ambas as linhagens (Tabela 51 e 53).

Encontra-se na Tabela 56 os parâmetros cinéticos de absorção  $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{mim}$  de Si em plantas de mamona. Houveram menores valores de  $C_{mim}$  de Si para os tratamentos com crescimento sem  $Al^{3+}$ , sendo assim, concentração de Si na solução necessárias para sua absorção são menores (BARBER, 1984).

**Tabela 56.** Média dos parâmetros cinéticos ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ) da absorção de silício de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	$C_{min}$ Si	$K_m$ Si	$V_{max}$ Si
	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol cm}^{-2} \text{h}^{-1} \times 10^{-3}$
0 Si e $Al^{3+}$	50,4c	54,3b	1,4a
1,7 Si	50,2c	52,4c	0,5b
1,1 $Al^{3+}$	51,8b	53,0bc	0,5b
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	55,9a	56,3a	0,4b
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>			
Linhagens			
CRZ 6	52,4	54,2	0,7
CRZ 18	51,8	53,8	0,7
CV(%)	2,8	3,2	21,4

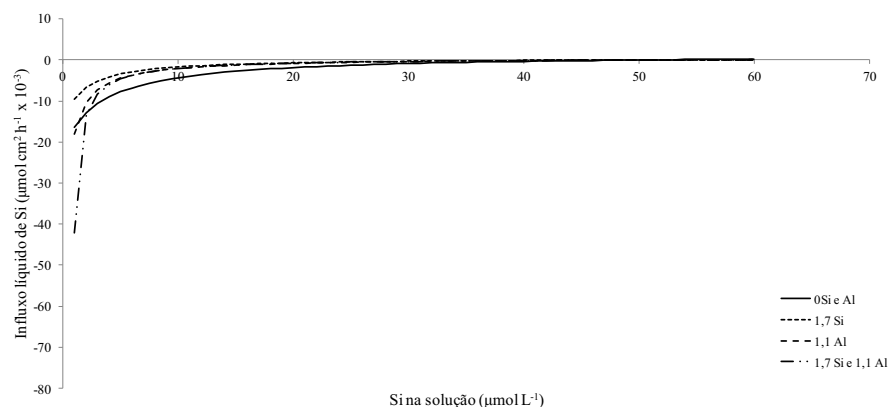
Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Por outro lado o tratamento 1,7 Si obteve menor valor de  $K_m$  de Si em comparação aos outros tratamentos, isso demonstra que plantas de mamona que foram crescidas na presença de Si, tem maior afinidade pela absorção por esse íon (BARBER, 1984).

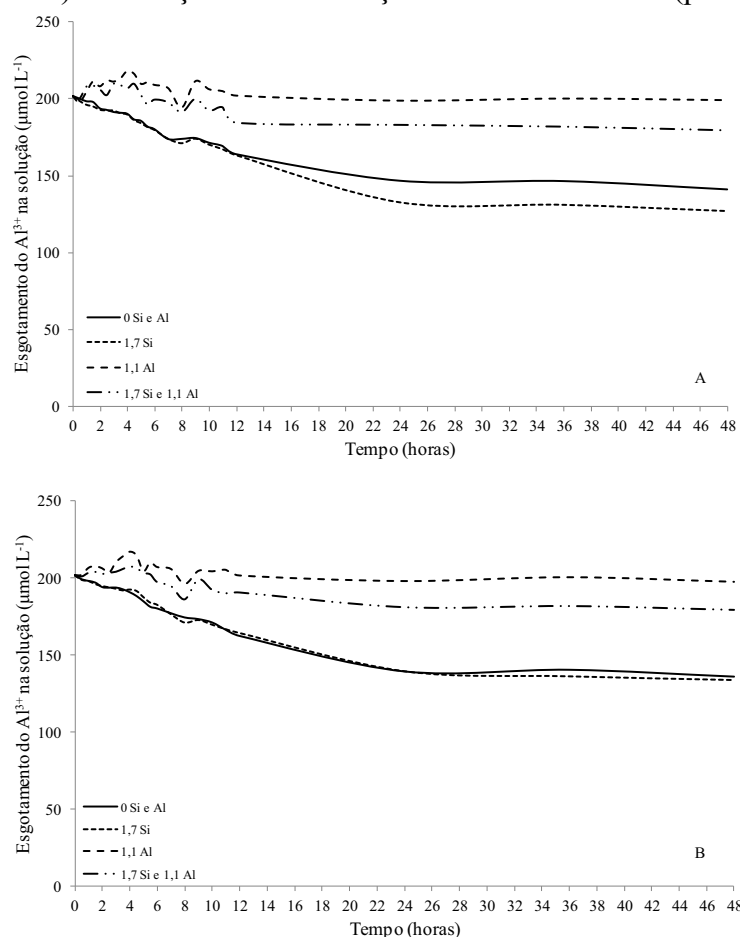
Houve diferença para  $V_{max}$  de Si entre os tratamentos, sendo que o tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  obteve o maior valor, ou seja, plantas que cresceram sem a presença de Si e  $Al^{3+}$  "absorvem" mais Si em comparação aos outros tratamentos. No entanto, o  $Al^{3+}$  não influencia negativamente na absorção de Si por plantas de mamona, assim como ocorre para arroz de terras altas, isso por que, o tratamento crescido com 1,7 Si obteve o mesmo  $V_{max}$  de Si de que os tratamentos crescidos na presença de  $Al^{3+}$  (Tabela 56).

Apesar de haver diferenças entre tratamentos para os parâmetros cinéticos, observa-se na Figura 26 que praticamente não há absorção de Si por plantas de mamona, havendo basicamente efluxo, comportamento este que ocorre em todos os tratamentos. Isso confirma que plantas de mamona são não acumuladoras de Si.

Não foi possível calcular os parâmetros cinéticos para absorção de  $Al^{3+}$  em plantas de mamona, em especial de plantas dos tratamentos crescidos na presença de  $Al^{3+}$ . Não sendo possível ajuste em nenhuma equação existente no software Cinética. Verifica-se nas curvas de esgotamento de  $Al^{3+}$  na solução nutritiva, que nos tratamentos crescidos com  $Al^{3+}$  praticamente não houve absorção de  $Al^{3+}$  (Figura 27A e B), dessa forma, não foi possível ajuste para obtenção dos parâmetros cinéticos. Além disso, o comportamento observado foi inconstante. Provavelmente tenha ocorrido efluxo de  $Al^{3+}$  para a solução nutritiva.



**Figura 26.** Taxas de influxo líquido de silício, estimadas de acordo com concentração de silício na solução nutritiva sob cultivo de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos)



**Figura 27.** Curvas de esgotamento de alumínio na solução nutritiva em 48 horas sob cultivo de linhagens de mamona, CRZ 6 tolerante (A) e CRZ 18 suscetível ao  $\text{Al}^{3+}$  (B) em função de combinações silício e alumínio (pré tratamentos)

Esse comportamento pode ter ocorrido devido aos danos estruturais causados pelo  $\text{Al}^{3+}$  nas raízes das plantas de mamona cultivadas sob estresse (Figura 24B e F). Dessa forma, o mecanismo de absorção de nutrientes pela raiz é alterado, absorvendo

assim menos nutrientes (Tabela 51 e 53), além do fato de haver menor quantidade de raiz para tal (Tabela 30). Portanto, pode ser que além do  $Al^{3+}$  influenciar a absorção de nutrientes, pode também alterar a absorção do próprio  $Al^{3+}$ , de forma que, as curvas de esgotamento não tenham um comportamento padrão.

Ainda, sabe-se que a toxicidade do alumínio está ligada a mudanças na homeostase celular do cálcio e no bloqueio de canais na membrana plasmática, e, há alteração da permeabilidade da membrana plasmática (KOCHIAN, 1995; ZHANG; RENGEL, 1999; YAMAMOTO et al., 2001). Esses danos influenciam negativamente a capacidade da raiz de absorver nutrientes, e por consequência, também do próprio  $Al^{3+}$ .

Houve menor teor de compostos fenólicos solúveis na parte aérea de plantas de mamona no tratamento 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$  em comparação aos demais tratamentos (Tabela 57), ou seja, as plantas pertencentes a esse tratamento estavam em menor nível de estresse. Esse comportamento aliado a maior crescimento radicular (Tabela 45 e 46) e menor teor e acúmulo de  $Al^{3+}$  na parte aérea (Tabela 54) podem indicar que o Si tenha efeito amenizador da toxidez por  $Al^{3+}$  também em plantas de mamona. No entanto, isso não se traduziu em maior desempenho das variáveis de crescimento, como por exemplo altura de plantas, número de folhas, produção de massa seca da parte aérea e raiz (Tabela 44). Em compensação, não houve diferença entre os tratamentos para teor de compostos fenólicos solúveis em raízes de plantas de mamona (Tabela 57).

Ao comparar as linhagens quanto ao teor de compostos fenólicos, observa-se que a linhagem CRZ 6, considerada tolerante ao  $Al^{3+}$ , obteve menor teor em comparação a linhagem suscetível ao  $Al^{3+}$  (Tabela 57). Isso mais uma vez vem comprovar a seleção das linhagens como suscetível e tolerante ao  $Al^{3+}$  para utilização no presente experimento.

Nos tratamentos sem presença de  $Al^{3+}$  houve maior acúmulo de lignina na parte aérea, no entanto, não houve interferência do Si no acúmulo deste composto (Tabela 57). Por outro lado, para acúmulo de lignina nas raízes, o tratamento 1,7 Si e 1,1  $Al^{3+}$ , obteve menor valor em comparação ao tratamento 1,1  $Al^{3+}$ . Ainda, não houve diferença significativa entre tratamentos para teor de celulose e FDA na parte aérea e raiz de plantas de mamona (Tabela 58).

**Tabela 57.** Média do teor de compostos fenólicos solúveis e acúmulo de lignina na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Teor de compostos fenólicos solúveis		Acúmulo de lignina	
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz
	-----g 100 g <sup>-1</sup> -----		-----%-----	
0 Si e $Al^{3+}$	4,6a	6,0	6,3a	4,2c
1,7 Si	4,5a	5,9	6,5a	4,4c
1,1 $Al^{3+}$	4,6a	5,9	4,4b	6,1a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	4,1b	5,9	4,2b	5,2b
-----				
Linhagens				
CRZ 6	4,3b	5,7	6,5a	4,9
CRZ 18	4,6a	6,2	4,2b	5,0
CV(%)	6,4	13,3	6,1	5,7

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

**Tabela 58.** Média do teor de celulose e FDA na parte aérea e raiz de linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Celulose		FDA	
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz
	-----%-----		-----%-----	
0 Si e $Al^{3+}$	17,8	29,6	26,9	35,4
1,7 Si	17,9	29,6	25,0	35,7
1,1 $Al^{3+}$	17,4	28,3	23,5	35,9
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	19,7	29,0	25,2	36,1
-----				
Linhagens				
CRZ 6	16,5b	31,8a	24,5	38,6a
CRZ 18	19,9a	26,4b	25,8	33,0b
CV(%)	12,6	7,3	11,8	7,1

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade

Assim como ocorreu para o experimento de arroz de terras altas (experimento 4), o não aumento do teor de lignina nos tratamentos cultivados sob estresse por  $Al^{3+}$ , pode contribuir para explicar o não aumento da espessura radicular nos mesmos tratamentos avaliados em microscopia (Tabela 48). Uma vez que o aumento da espessura da parede celular, ocorre principalmente devido a deposição de compostos químicos nas raízes, como por exemplo lignina (VÁZQUEZ et al., 1999; KONARSKA, 2005).

Na solução nutritiva coletada antes da colheita do experimento de mamona, verificou-se a existência ou não dos seguintes ácidos orgânicos: ácido acético, propiônico, butírico, málico, tartárico, oxálico e cítrico. Destes apenas ácidos oxálico e tartárico foram detectados e quantificados em todos os tratamentos (Tabela 59). Destaca-se

ainda, o ácido cítrico, que foi identificado e quantificado somente nos tratamentos onde as plantas de mamona estavam sob estresse por  $Al^{3+}$ , o que leva a crer que sua exsudação ocorra em plantas sob estresse por  $Al^{3+}$ .

**Tabela 59.** Média de do teor ácidos orgânicos identificados na solução nutritiva antes da colheita cultivadas com linhagens de mamona (CRZ 6 tolerante e CRZ 18 suscetível ao  $Al^{3+}$ ) em função de combinações silício e alumínio

Combinações	Ácido Oxálico	Ácido Tartárico	Ácido cítrico
	-----mg L <sup>-1</sup> -----		
0 Si e $Al^{3+}$	32,7c	2,4a	-*
1,7 Si	35,0b	2,3a	-*
1,1 $Al^{3+}$	35,0b	2,4a	5,3a
1,7 Si e 1,1 $Al^{3+}$	38,6a	1,8b	3,5b
Linhagens			
CRZ 6	34,1b	1,9b	4,8
CRZ 18	36,6a	2,5a	4,1
CV(%)	5,4	14,0	20,6

Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada parâmetro, diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade. \* não foi detectada a presença na solução nutritiva

Houve maior produção de ácido oxálico por plantas crescidas com 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$ . Sabe-se que há maior produção de ácidos orgânicos nos tratamentos com  $Al^{3+}$ , no entanto, não é possível dizer se a maior concentração de ácido oxálico no tratamento citado ocorreu devido a presença do  $Al^{3+}$  ou Si, ou ambos. Isto por que, o tratamento 1,7 Si obteve mesma concentração de ácido oxálico de que o tratamento 1,4  $Al^{3+}$ . Dessa forma, pode ser que o Si também tenha capacidade de aumentar a exsudação de ácido oxálico pela planta. É importante salientar que o tratamento 0 Si e  $Al^{3+}$  obteve concentração de ácido oxálico inferior a todos outros tratamentos, ou seja, no tratamento onde não havia presença de Si ou  $Al^{3+}$  houve menor produção do ácido em questão. O tratamento 1,7 Si e 1,4  $Al^{3+}$  obteve a menor concentração de ácido tartárico entre os tratamentos.

Ainda, foi detectada a presença do ácido cítrico somente nos tratamentos sob estresse por  $Al^{3+}$ , esse fato é curioso, porque isso ocorreu somente para um dos ácidos estudados. Portanto, esses comportamentos demonstram que não há um padrão no que se diz respeito a produção de ácidos orgânicos por raízes de mamona sob estresse por  $Al^{3+}$  e ou aplicação de Si.

### 6.5.1. Considerações finais

Houve maior teor e acúmulo de Si na raiz do tratamento 1,7 Si e 1,1 Al<sup>3+</sup> em comparação ao tratamento 1,1 Al<sup>3+</sup>.

Isso pode ter contribuído, para o menor teor e acúmulo de Al<sup>3+</sup> na parte aérea de plantas de mamona submetidas a estresse por Al<sup>3+</sup> e aplicação de Si em comparação a plantas submetidas apenas a estresse por Al<sup>3+</sup>.

Pode-se considerar que o Si contribuiu amenizando o estresse por Al<sup>3+</sup> em plantas de mamona (planta não acumuladora de Si), assim como ocorreu para plantas de arroz, no entanto a amenização observada no presente experimento não se traduziu em maior desempenho das variáveis de crescimento, como altura de plantas, número de folhas, produção de massa seca da parte aérea e raiz.

Por outro lado, o Si contribuiu para maior comprimento radicular do tratamento 1,7 Si e 1,1 Al<sup>3+</sup> em comparação ao tratamento 1,1 Al<sup>3+</sup>. Efeito que ocorreu especialmente para a linhagem CRZ H18 (suscetível ao Al<sup>3+</sup>). O Si também contribuiu para maior crescimento de raízes finas e grossas para o tratamento descrito acima.

O Al<sup>3+</sup> causou maior dano a raízes de diâmetro finas de plantas de mamona em comparação a raízes médias e grossas.

Raízes de mamona sob toxidez por Al<sup>3+</sup> sofreram danos celulares. Ocorrendo rompimento de células epidérmicas e do parênquima, principalmente na região mais externa do córtex.

Assim como ocorreu no experimento 4 (arroz), confirma-se o dano causado pelo Al<sup>3+</sup> ao aumentar a distância com que ocorre a diferenciação dos tecidos primários na zona meristemática.

A coloração de raízes com hematoxilina férrica demonstrou diferenças visuais entre os tratamentos. Não houve dano ao meristema apical radicular de raízes referentes ao tratamento 0 Si e Al<sup>3+</sup> de ambas linhagens. Por outro lado, houve dano ao mesmo nos tratamentos com Al<sup>3+</sup> nas duas linhagens, indiferentemente se tolerante ou suscetível ao Al<sup>3+</sup> e presença ou não de Si.

Ao contrário do que foi observado em plantas de arroz (experimento 4), não foi verificado nenhum benefício do Si sob características morfológicas internas de raízes de mamona sob estresse por Al<sup>3+</sup>.

Mesmo havendo diferenças entre tratamentos para parâmetros cinéticos, a taxa de influxo líquido de Si demonstra que plantas de mamona não absorveram Si.

O  $\text{Al}^{3+}$  não interferiu na absorção de Si por plantas de mamona ( $V_{\text{max}}$ ), como ocorreu para plantas de arroz (experimento 4).

Não foi possível obter  $C_{\text{mim}}$ ,  $K_m$  e  $V_{\text{max}}$  de absorção de  $\text{Al}^{3+}$  de plantas de mamona que foram crescidas em solução nutritiva com  $\text{Al}^{3+}$ . Isso porque o  $\text{Al}^{3+}$  causou danos nas raízes que prejudicam a absorção iônica.

O Si não alterou o teor e acúmulo de macro e micronutrientes em plantas de mamona sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  em comparação a plantas crescidas somente na presença de  $\text{Al}^{3+}$ .

Houve menor teor de compostos fenólicos na parte aérea de plantas submetidas a estresse por  $\text{Al}^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas submetidas apenas a estresse por  $\text{Al}^{3+}$ , ou seja, o Si diminuiu o estresse de plantas que estavam sob ação do  $\text{Al}^{3+}$ .

Detectou-se na solução nutritiva antes da colheita das plantas de mamona a presença de ácidos oxálico e tartárico em todos tratamentos; e a presença de ácido cítrico somente nos tratamentos 1,1  $\text{Al}^{3+}$ ; 1,7 Si e 1,1  $\text{Al}^{3+}$ .

Houve maior produção de ácido oxálico por plantas sob estresse por  $\text{Al}^{3+}$  e aplicação de Si em comparação a plantas sem estresse, independentemente da presença de Si. Por outro lado, houve menor produção de ácido tartárico por esse tratamento.



## 7. CONCLUSÕES

O cloreto de alumínio e a concentração de  $1480 \mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  são mais eficazes em causar toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solução nutritiva.

Os cultivares de arroz de terras altas BRS Pepita, BRS Bonança, BRS Primavera, BRS Sertaneja, IAC 202, AN Cambará e ANa 7007 foram considerados tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$ ; e, os cultivares BRS Monarca e Maravilha suscetíveis.

As linhagens de mamona CRZ H06, H11 e H17 foram consideradas tolerantes ao  $\text{Al}^{3+}$ ; e, as linhagens CRZ H12, H15, H18, H19, H22 e FCA suscetíveis.

O Si ameniza a toxidez causada por  $\text{Al}^{3+}$  em plantas de arroz de terras altas e mamona.

Em plantas de arroz de terras altas cultivadas sob toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  e aplicação de Si há maior produção de massa seca da parte aérea, altura de plantas, teor e acúmulo de Si na parte aérea; e, menor teor, acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$  e compostos fenólicos na parte aérea.

Há maior teor e acúmulo de Si na raiz; e, menor teor e acúmulo de  $\text{Al}^{3+}$ ; e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de mamona cultivadas sob toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  e aplicação de Si.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 373-378, 2003.

ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. Relationship between acidity and chemical properties of brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 337-343, 2003.

AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 4. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 635 p.

AGRONORTE. Cultivar de arroz AN Cambará. 2014a. Disponível em: <<http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/50-Cambara>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

AGRONORTE. Cultivar de arroz ANa 7007. 2014b. Disponível em: <[http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/48-ANa\\_7007](http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/48-ANa_7007)>. Acesso em: 20 nov. 2014.

AHN, S. J. et al. Aluminum inhibits the H<sup>+</sup>-ATPase activity by permanently altering the plasma membrane surface potentials in squash roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 126, n. 2, p. 1381-1390, 2001.

ANDREW, C. S.; VANDEN BERG, P. J. The influence of aluminum on phosphate sorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 24, n. 3, p. 341-51, 1973.

ANDREW, C. S.; JOHNSON, A. D.; SANDLAND, R. L. Effect of aluminium on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 24, n. 3, p. 325-39, 1973.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley, 1984. 398 p.

BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado**. Piracicaba: Potafos, 1987. 129 p. (Boletim técnico, 9).

BARCELO, J.; GUEVARA, P.; POSCHENRIEDER, C. H. Silicon amelioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays* l. ssp. *mexicana*). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 154, n. 2, p. 249-255, 1993.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 75-92, 2002.

BASTOS, C. R. et al. IAC 202: arroz de alta produtividade e qualidade para cultura de sequeiro. **O Agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 1, 2000.

BELTRÃO, N. E. de M. et al. **Mamona: árvore do conhecimento e sistemas de produção para o semi-árido brasileiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2003. 19 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 70).

BENNET, B. J.; BREEN, C.M. The recovery of the roots of *Zea mays* L. from various aluminium treatments: towards elucidating the regulatory processes that underlie root growth control. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 153-163, 1991.

BERTSCH, P. M.; PARKER, D. R. Aqueous polynuclear aluminum species. In: SPOSITO, G. (Coord.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton : CRC Press, 1995. p. 117-168.

BEUTLER, A. N.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Efeito do alumínio sobre o crescimento de duas espécies florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n. 4, p. 923-928, 2001.

BHUJA, P.; MCLACHLAN, K.; STEPHENS, J.; TAYLOR, G. Accumulation of 1,3- $\beta$  Dglucans, in response to aluminum and cytosolic calcium in *Triticum aestivum*. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 45, n. 5, p. 543-549, 2004.

BLOOM, P. R.; ERICH, M. S. The quantitation of aqueous aluminum. In: SPOSITO, G. (Coord.). **The Environmental chemistry of aluminum**. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 1996. p. 1-38.

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

BOL, J. F.; LINTHORST, H. J. M; CORNELISSEN, B. J. C. Plant pathogenesis-related proteins induced by virus infection. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.28, n. 1, p.113-138, 1990.

BRASIL. Decreto lei n. 2954, de 16 de janeiro de 1980. Aprova o regulamento da lei nº 6894 que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Normas Jurídicas**, DEC 004954, p. 27, 14 jan. 2004.

BRESEGHELLO, F. et al. **BRS Pepita**: cultivar de arroz de terras altas produtiva e precoce. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2007. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico on-line, 150). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/706257/1/comt150.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

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

CABANÉ, M. et al. Condensed lignins are synthesized in poplar leaves exposed to ozone. **Plant Physiology**, Rockville, v. 134, n. 2, p. 586-594, 2004.

CAMARGO, C. E. O.; CAMARGO, O. B. A. Diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva na tolerância de cultivares de arroz. **Bragantia**, Campinas, v. 43, n. 2, p. 357-368, 1984.

CARVALHO, W. A. et al. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médici”**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1983. 95 p.

CASTRO, A. P. et al. **BRS Monarca**: cultivar de arroz de terras altas com excelência em qualidade de grãos. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2007. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado técnico, 148). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/67254/1/comt148.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2014.

CASTRO, E. M.; BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P. **Cultivo do arroz de terras altas**: cultivares. Embrapa: Sistemas de Produção, No. 1, Versão eletrônica, 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/cultivares.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 54, n. 4, p. 564-568, 1974.

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus - stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, v.14, n. 4, p. 505-508, 1974.

CLARK, R. B. et al. Effect of trace element deficiencies and excesses on mineral nutrients in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 3, n. 4, p. 357-374, 1981.

CLARKSON, D. T. The effect of aluminium and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of *Allium cepa*. **Annals of Botany**, v. 29, n. 2, p. 309-315, 1965.

COCKER, K. M.; EVANS, D. E.; HODSON, M. J. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or an in planta mechanism. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 104, n. 4, p. 608-614, 1998.

COPELAND, L.; DELIMA, M.L. The effect of aluminium on enzyme activities in wheat roots. **Journal of Plant Physiology**, Washington, DC, v. 140, n. 6, p. 641-645, 1992.

CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Influence of silicon pretreatment on aluminum toxicity in maize roots. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 190, n. 2, p. 203-209, 1997.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DONCHEVA, S. et al. Root cell patterning: a primary target for aluminium toxicity in maize. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 56, n. 414, p. 1213-1220, 2005.

EDWARDS, J. H.; BARBER, S. A. Nitrogen flux into corn roots as influenced by shoot requirement. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 3, p. 471-473, 1976.

ELEFThERIOU, P.E.; MOUSTAKAS, M.; GRAGISKOS, N. Aluminate-induced changes in morphology and ultrastructure of *Thinopyrum* roots. **Journal of Experimental and Botany**, London, v. 44, n. 2, p. 427-436, 1993.

EMBRAPA. **Manejo da cultivar Maravilha**. Goiânia: Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, 1997. 38 p. (EMBRAPA-CNPAP. Informe Técnico, 1).

EMBRAPA. Disponível em:

<<http://www22.sede.embrapa.br/snt/licit/edital/informativo.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

EPSTEIN, E.; HAGEN, C. E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 27, n. 3, p. 457-474, 1952.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, n. 6, p. 641-664, 1999.

EVERT, R. F. **Esau's Plant Anatomy**. 3. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2006. 601 p.

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, n. 7, p. 1133-1142, 1988.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: SBCS, 2006. 432 p.

FERREIRA, R. P. et al. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio por técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 6, p. 789-795, 1995.

FISHER, R. A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 29, n. 5, p. 897-912, 1978.

FLEMING, A. L.; SCHWARTZ, J. W.; FOY, C. D. Soil: aluminium toxicity in plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 715-719, 1974.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 589 p.

FOY, C. D. General principles involved in screening plants for aluminum and maganese tolerance. In: WRIGHT, M. (Coords.). **Plant adaptation to mineral stress in problem soils**. New York: Cornell University, 1976. p. 65-72.

FREITAS, F. A. et al. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 72-79, 2006.

FREITAS, L. B.; FERNANDES, D. M.; MAIA, S. C. M. Interação silício e alumínio em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solo alumínico. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 507-515, 2012.

FREITAS, L. B. **Silício na tolerância ao alumínio por plantas de arroz**. 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas - Unesp, Botucatu, 2011.

FUKUDA, H.; KOMAMINE, A. Lignin synthesis and its related enzymes as markers of tracheary-element differentiation in single cells isolated from the mesophyll on *Zinnia elegans*. **Planta**, Neva York, v. 155, n. 5, p. 423-430, 1982.

FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, n. 4, p. 587-594, 1981.

FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. **Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas.**

Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. p. 21-26. (Boletim técnico, 121).

GALVEZ, L.; CLARK, R. B. Effects of silicon on growth and mineral composition of sorghum (*Sorghum tricolor*) grown with toxic levels of aluminium. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. (Coords.). **Plant-soil interaction at low pH.** Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 815-823.

GALVEZ, L. et al. Silicon interactions with manganese and aluminium toxicity in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 10, n. 9, p. 1139-1147, 1987.

GERRITS, P. O. **The application of glycol methacrylate in histotechnology; some fundamental principles.** Netherlands: Departament of Anatomy and Embryology State University Groningen, 1991. 80 p.

GIONGO, V.; BOHNEN, H. Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 3, p. 348-356, 2011.

GUIMARÃES, C. M. et al. Resistência do arroz de terras altas ao alumínio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p.855-860, 2006.

GUSTAFSSON, J. P. **VISUAL MINTEQ.** Versão 3.0. Estocolmo: KTH, Department of Sustainable Development, Environmental Science and Engineering, 2012. Disponível em: <<http://www2.lwr.kth.se/English/OurSoftware/vminteq/index.html>>. Acesso em: 14 mai. 2013.

HAMMOND, K. E.; EVANS, D. E.; HODSON, M. J. Aluminum/silicon interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 173, n. 1, p. 89-95, 1995.

HODSON, M. J.; EVANS, D. E. Aluminium/silicon interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 46, n. 2, p. 161-171, 1995.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Aluminium /silicon interactions in conifers. **Journal Inorganic Biochemical**, Chicago, v. 76, n. 2, p. 89-98, 1999.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. The interaction between silicon and aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: growth analysis and X-ray microanalysis. **Annals of Botany**, Oxford, v. 72, n. 5, p. 389-400, 1993.

HUANG, J. W. et al. Aluminum interactions with voltage-dependent calcium transport in plasma membrane vesicles isolated from roots of aluminum-sensitive and -resistant wheat cultivars. **Plant Physiology**, Rockville, v. 110, n. 2, p. 561-569, 1996.

HUANG, P. M.; VIOLANTE, A. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Coords.). **Interactions of soil minerals with natural organic and microbes**. Madison: Soil Science of America, 1986. p. 159-221.

JACOBSEN, A. L. et al. Do xylem fibers affect Vessel Cavitation Resistance? **Plant Physiology**, Rockville, v. 139, n. 1, p. 546-556, 2005.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. Nova York: McGraw-Hill, 1940. 523 p.

JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminum inhibition of the inositol 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role of aluminum toxicity. **Plant Cell**, Baltimore, v. 7, n. 11, p. 1913-1922, 1995.

JUSTINO, G. C. et al. Absorção e redução de nitrato em duas cultivares de arroz na presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 8, p. 1285-1290, 2006.

KIDD, P. S. et al. The role of root exudates in aluminum resistance and silicon induced amelioration of aluminum toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 52, p. 1339-1352, 2001.

KLIMASHEVSKII, E. L.; DEDOV, V. M. Localization of mechanism of growth inhibiting action of  $Al^{3+}$  in elongating cell walls. **Soviet Plant Physiology**, Russia, v. 28, n. 5, p. 1060-1066, 1976.

KLIMASHEVSKII, E. L. et al. Physiological responses to aluminium toxicity in root zone of pea varieties. **Agrochimica**, Pisa, v. 26, p. 487-496, 1972.

KLIMASHEVSKII, E. L. et al. Specifics of the physiological activity of pea plants in connection with unequal resistance of different varieties to mobile aluminum. **Soviet Plant Physiology**, Russia, v. 17, n. 3, p. 372-378, 1970.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 46, n. 1, p. 237-260, 1995.

KOCHIAN, L. V.; JONES, D. L. Aluminum toxicity and resistance in plants. In: YOKEL, R.; GOLUB, M. S. (Coords.). **Research Issues in Aluminum Toxicity**. Bristol: Taylor and Francis Publishers, 1997. p. 69-90.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, Palo Alto, v.55, n. 1, p. 459-493, 2004.



KONARSKA, A. Changes in the development and structure of *Raphanus sativus* L. var. *radicula Pers.* Root under aluminum stress conditions. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus (Journal)*, Lublinie, v. 4, n. 1, p. 85-97, 2005.

KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante.** Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 39 p. (Boletim técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Coord.). **Nutrição mineral de plantas.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 355-374.

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 101-106. 1999.

LARS, H. et al. Do the extracellular enzymes cellobiose dehydrogenase and manganese peroxidase form a pathway in lignin biodegradation? **FEBS Letters**, Heidelberg, v. 477, n. 1, p. 79-83, 2000.

LEMOS FILHO, J. P. **Efeito do alumínio sobre os teores de alguns elementos minerais, sobre a fotossíntese e sobre a atividade de certas oxidases em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench).** 1982. 46 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1982.

LIANG, Y. C. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Massachusetts, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007.

LIMA, R. L. S. et al. Crescimento da mamoneira em solo com alto teor de alumínio na presença e ausência de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 15-21, 2007.

LUX, A. et al. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Plant Physiology**, Rockville, v. 115, n. 1, p. 87-92, 2002.

MA, J. F.; FURUKAWA, J. Recent progress in the research of external Al detoxification in higher plants: a mini review. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v.97, n.1, p. 46-51, 2003.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium Tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 6, n. 6, p. 273-279, 2001.

MA, J. F.; SASAKI, M.; MATSUMOTO, H. Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 188, n. 2, p. 171-176, 1997.

- MA, J. F. et al. Aluminium targets elongating cells by reducing cell wall extensibility in wheat roots. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 45, n. 5, p. 583-589, 2004.
- MA, J. F. et al. Response of rice to Al stress and identification of quantitative trait loci for Al tolerance. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 43, n. 6, p. 652-659, 2002.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002. 274 p.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Amsterdam, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 215 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípio e aplicações**. 2. ed. Piracicaba : Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 315 p.
- MARIANO, E. D.; JORGE, R. A.; KELTJENS, W. G.; MENOSSI, M. Metabolism and root exudation of organic acid anions under aluminium stress. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n. 1, p. 157-172, 2005.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.
- MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review Cytology**, San Diego, v.200, n. 1, p. 1-46, 2000.
- MATSUMOTO, H. et al. Localization of aluminum in tea leaves. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 17, n. 3, p. 627-631, 1976.
- MEHARG, A. A. The role of the plasmalemma in metal tolerance in angiosperms. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 88, n. 1, p. 191-198, 1993.
- MENDONÇA, R. J. et al. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 7, p. 843-846, 2003.
- MENGEL, K. E.; KIRKBY, G. A. Further elements of importance. In: \_\_\_\_\_. (Coord.). **Principles of plant nutrition**. 4. ed. Bern: International Potash Institute, 1987. p. 573-588.
- MERIGA, B. et al. Alleviating effect of citrate on alluminium toxicity of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Current Science**, Bangalore, v. 85, n. 3, p. 383-386, 2003.

- MIFTAHUDIN., NURLAELA., JULIARNI. Uptake and distribution of aluminum in root apices of two rice varieties under aluminum stress. **HAYATI Journal of Biosciences**, Bogor, v. 14, n. 3, p. 110-114, 2007.
- MISTRO, J. C. et al. Avaliação de genótipos de trigo, de diferentes origens, em relação à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 1-9, 2001.
- MIYASAWA, M.; CHIERICE, G. O.; PAVAN, M. A. Amenização da toxicidade de alumínio à raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 209-215, 1992.
- MORIMURA, S.; MATSUMOTO, H. Effect of aluminum on some properties and template activity of purified pea DNA. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 19, n. 3, p. 429-436, 1978.
- NEUMAM, D.; NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, Nova York, v. 56, n. 7, p. 685-692, 2001.
- NICHOL, B. E.; OLIVEIRA, L. A. Effects of aluminium on the growth and distribution of calcium in roots of an aluminium-sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare*). **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 73, n. 12, p. 1849-1858, 1995.
- NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 695-698, 1978.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.
- O'BRIEN, T. P.; FEDER, N.; MCCULLY, M. E. Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue. **Protoplasma**, Vienna, v. 59, n. 2, p. 368-373, 1964.
- PEIXOTO, P. H. P.; PIMENTA, D. S.; CAMBRAIA, J. Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 1, p. 17-25, 2007.
- PEREIRA, J. M. et al. Efeito do alumínio sobre a absorção, o acúmulo e o fracionamento do fósforo em sorgo. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.4, p.961-967, 2008
- PIÑEROS, M. A. et al. The Physiology and Biophysics of an Aluminum Tolerance Mechanism Based on Root Citrate Exudation in Maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, n. 3, p. 1194-1206, 2002.
- POLLE, E.; KONZAK, C. F.; KITTRICK, J. A. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. **Crop Science**, Madison, v. 18, n. 5, p. 823-827, 1978.

RAES, J. et al. Genome-wide characterization of the lignifications toolbox in Arabidopsis. **Plant Physiology**, Rockville, v. 133, n. 3, p. 1051-1071, 2003.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

RIBEIRO, C. **Crescimento, morfologia e mudanças no sistema antioxidativo em raízes de arroz, submetidas ao alumínio**. 2011. 73 p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Cinética: software para estimar as constantes Vmax e Km da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBCS, 1992. p. 124-125.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; JONES, D. L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 52, n. 1, p. 527-560, 2001.

RYAN, P. R.; DITOMASO, J. M.; KOCHIAN, L. V. Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 44, n. 2, p. 437-446, 1993.

SACRAMENTO, L. V.; ROSOLEM, C. A. Cinética de absorção de potássio e seus ajustes em plantas de soja em função da idade e estado nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 213-219, 1997.

SAKIHAMA, Y.; YAMASAKI, H. Lipid peroxidation induced by phenolics in conjunction with aluminum ions. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 45, n. 2, p.249-254, 2002.

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. L. Silicon and aluminium deposition in the cell wall phytoliths of gymnosperm leaves. In: MEUNIER, J. D.; COLIN, F. A. A. (Coord.). **Phytoliths: applications in earth science and human history**. Rotterdam: A A Balkema, 2001. p. 343-355.

SASAKI, M.; YAMAMOTO, Y.; MATSUMOTO, H. Lignin deposition induced by aluminium in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 96, n. 2, p. 193-198, 1996.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, New York, v. 58, n. 3, p. 151-199, 1997.

SCHLINDWEIN, J. A. et al. Redução da toxidez de alumínio em raízes de soja por culturas antecessoras no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 1, p. 85-88, 2003.

SEVERINO, L. S. et al. Crescimento e produtividade da mamoneira adubada com macronutrientes e micronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 563-568, 2006.

SEVERINO, L. S. et al. **Crescimento e produtividade da mamoneira sob fertilização química em região semi-árida**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. 20p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 62).

SILVA, I. R. et al. Aluminum accumulation at nuclei of cells in the root tip. Fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy. **Plant Physiology**, Rockville, v. 123, n. 2, p. 543-52, 2000.

SILVA, L. P.; SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Componentes da parede celular e digestibilidade *in vitro* de palha de arroz (*Oryza sativa*) com diferentes teores de silício. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1205-1208, 2005.

SILVA, S. et al. Differential aluminium changes on nutrient accumulation and root differentiation in an Al sensitive vs. tolerant wheat. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 91-98, 2010.

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**, New York, v. 299, p. 152-178, 1999.

SIVAGURU, M. et al. Aluminum-induced 1,3-b -D-glucan inhibits cell-to-cell trafficking of molecules through plasmodesmata. A new mechanism of aluminum toxicity in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 124, n. 3, p. 991-1005, 2000.

SIVAGURU, M.; HORST, W. J. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 1, p. 155-163, 1998.

SHIMOGAWARA, K.; USUDA, H. Uptake of inorganic phosphate by suspension-cultured tobacco cells: kinetics and regulation by Pi starvation. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v.36, n.2, p.341-351, 1995.

SLASKI, J. J. Response of calmodulin-dependent and calmodulin-independent NAD kinase to aluminium in root tips from various cultivated plants. **Journal Plant Physiology**, Washington, DC, v. 136, n. 1, p. 40-44, 1990.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 719 p.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T. et al. (Coord.). **Science of the rice plant physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Police Research Center, 1995. p. 420-433.

TAYLOR, G. Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 123, n. 3, p. 987-996, 2000.

TENNANT, D. A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 6, p. 995-1001, 1975.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2. ed. Ithaca: Cornell University, 1994. 476 p.

VÁZQUEZ, M. D. et al. Change in apoplastic aluminum during the initial growth response to aluminum by roots of a tolerant maize variety. **Plant Physiology**, Rockville, v. 119, n. 2, p. 435-444, 1999.

VEPRASKAS, M. J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R. E. (Coords.). **Plant-environment interactions**. New York: M. Dekker, 1994. p. 263-287.

VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v.17, n. 1, p.129- 143, 2005.

WANG, J. et al. Aluminum tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, Zhejiang, v. 7, n. 10, p. 769-787, 2006.

WANG, Y.; STASS, A.; HORST, W. J. Apoplastic Binding of Aluminum Is Involved in Silicon-Induced Amelioration of Aluminum Toxicity in Maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 136, n. 3, p. 3762-3770, 2004.

WEISS, E. A. **Oilseed crops**. London: Longman, 1983. 660 p.

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

YAMAMOTO, Y.; HOBAYASHI, Y.; MATSUMOTO, H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 125, n. 1, p. 199-208, 2001.

ZHANG, W. H.; RENGEL Z. Aluminium induces an increase in cytoplasmic calcium in intact wheat root apical cells. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 26, n. 5, p. 401-409, 1999.

ZONTA, E. **Estudos da Tolerância ao Alumínio em Arroz de Sequeiro e Seus Efeitos Sobre a Interface Solo-Planta**. 2003. 139 p. Tese (Pós Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. (Coord.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

ZSOLDOS, F. et al. Influence of silicon on aluminium toxicity in common and durum wheats. **Agronomie**, Harpenden, v. 23, n. 4, p. 349–354, 2003.

ZULUAGA, V.J.; VALÊNCIA, A.G.; GONZALEZ, J. Contribución al estudio de la naturaleza de la resistencia del cafeto a *Ceratocystis fimbriata* (Ell. Halst). **Hunt. Cenicafé**, Chinchiná v. 2, n. 22, p.43-68, 1971.