



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**COMPORTAMENTO DE CULTIVARES DE ARROZ DE
SEQUEIRO EM SOLO ÁCIDO DA SAVANA COLOMBIANA**

Londrina
2017

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**COMPORTAMENTO DE CULTIVARES DE ARROZ DE
SEQUEIRO EM SOLO ÁCIDO DA SAVANA COLOMBIANA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito.

Londrina
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Contreras, Mario Sandoval .

Comportamento de cultivares de arroz de sequeiro em solo ácido da savana colombiana / Mario Sandoval Contreras. - Londrina, 2017.
110 f. : il.

Orientador: Osmar Rodrigues Brito.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2017.
Inclui bibliografia.

1. Oryza sativa - Tese. 2. Solos ácidos - Tese. 3. Índice de tolerância. - Tese. I. Brito, Osmar Rodrigues . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

MARIO SANDOVAL CONTRERAS

**COMPORTAMENTO DE CULTIVARES DE ARROZ DE SEQUEIRO EM
SOLO ÁCIDO DA SAVANA COLOMBIANA**

Tese apresentada ao programa de pós-graduação em agronomia, da universidade estadual de londrina. como requisito parcial à obtenção do título de doutor em agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dr. Adônis Moreira
Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuária – EMBRAPA

Dr. José Francirley Oliveira
Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

Dr. Paulo Vicente Zaccheo
Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

Prof. Dr. João Tavares Filho
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 22 de fevereiro 2017.

DEDICA

Aos meus pais, **Mario Sandoval Blanco** (*In memoriam*) e **Martha Contreras de S**, por tudo que fizeram por mim ao longo da minha vida.

À minha esposa Camila Alejandra Noguera e minha filha Maria Fernanda Sandoval pelo amor, paciência e dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela graça da vida;

Ao meu grande amigo Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito por ter me recebido e sempre mostrado o caminho correto a ser seguido, de forma única e exemplar. Desejo poder contribuir à ciência e a meus países Brasil e Colômbia com a mesma ética e entusiasmo que me transmitiu. Espero também que nossas agradáveis conversas tenham vida longa;

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

Aos professores do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, pela minha formação durante este curso;

À Federacion Nacional de Arroceros da Colombia (FEDEARROZ) e Fondo Nacional del Arroz (FNA), pela oportunidade recibida, especialmente aos comitês de produtores de arroz dos municipios de Aguazul e Yopal Casanare, Colômbia;

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) - Arroz e Feijão e Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) pelo fornecimento das sementes dos cultivares de arroz.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado;

À Dra Patricia Guzman Subgerente Técnico da Fedearroz-FNA Colômbia, e sua equipe pela oportunidade;

Aos doutores Miguel Diago Ramirez e Armando Castilla Lozano, por ter me incentivado e apoiado a buscar a posgraduação e pela constante demonstração de apoio;

Aos meus colegas Ricardo Perafan e José Omar Ospina (Genetistas), aos engenheiros Juan Carlos Diaz, Jorge Ardila e Francisco Hernandez da Federacion Nacional de Arroceros da Colombia (FEDEARROZ) e Fondo Nacional del Arroz (FNA) pelo apoio oferecido;

À Fazenda Agrícola EL YOPAL e sua excelente equipe por permitir realizar parte dos experimentos na sua área, e especialmente ao meu amigo Juan Bernardo Serrano Ardila, esposa e filhos pelo apoio incondicional no desenvolvimento deste trabalho.

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

Aos meus pais Mario Sandoval Blanco (*In memorian*) e Martha Contreras de S, pelo apoio em todas etapas da minha vida e pelas palavras de maior incentivo, principalmente nas horas de maior dificuldade;

Aos meus irmãos Luis Fernando, Hector Augusto e James Arturo Sandoval Contreras, pela força, coragem e esperança para ter sucesso neste projeto de vida. À minha esposa Camila Alejandra e minha filha María Fernanda pelo amor, compreensão, dedicação, companheirismo e ensinamentos em todos os momentos de nossas vidas.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

CONTRERAS, Mario Sandoval. **Comportamento de cultivares de arroz de sequeiro em solo ácido da savana colombiana**. 2017. 110f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

RESUMO

O alumínio do solo é um fator limitante de grande importância na produção agrícola de alimentos. Novos e mais produtivos cultivares de arroz são lançados a cada ano, indicando a necessidade de se buscar novas tecnologias, para incorporação de áreas menos férteis ao processo de produção. Durante os anos 2014 e 2015, no município de San Luís de Palenque, Casanare, nas savanas orientais da Colômbia, foi instalado um experimento em condições de campo com cultivares colombianos e brasileiros de arroz sequeiro. O clima da região é classificado como tropical úmido de savana, de acordo com a classificação de Koppen, com altitude de 250 m. O solo foi classificado como Oxic Dystrudepts com pH médio de 4,4 e saturação por alumínio de 83%. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos testados resultaram de um fatorial 8x5, em que os fatores foram 8 genótipos de arroz (4 colombianos e 4 brasileiros) e 5 taxas de saturação por Al na CTC do solo (0, 21, 43 62 e 83 %). Os genótipos foram: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao Al^{3+}) e CNA-8521 (sensível ao Al^{3+}) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, Goiânia, Brasil, e os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177, de origem brasileira e quatro cultivares comerciais colombianos: Fedearroz-68, Fedearroz-174, Fedearroz-2000, Fedearroz-67. Foi realizado um ensaio prévio de incubação do solo com uma mistura de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ com proporção Ca:Mg = 4:1, para definir as doses de calcário e ajustar as diferentes taxas de saturação por Al^{3+} . Após a condução dos ensaios foram feitas às seguintes avaliações: a) análises químicas do solo (pH, carbono orgânico, P, K, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H+Al,) para avaliação da fertilidade; b) análises química de tecidos vegetais: conteúdo de N, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , c) variáveis agrônômicas ou biométricas: altura de planta, número de perfilhos, massa seca da parte aérea, número de plantas/m², número de panículas/m², número de grãos cheios e chochos por panícula, produtividade (kg/ha) de grãos (13% de umidade), índice de tolerância ao Al^{3+} , índice de colheita. Os cultivares e linhagens de arroz de sequeiro de origem brasileira e colombiana diferem significativamente quanto aos efeitos do alumínio trocável do solo nas suas características biométricas e parâmetros fitotécnicos. Os cultivares de arroz IAPAR-177 e IAPAR-9 apresentaram tolerância superior à 43% de saturação por Al^{3+} na CTC do solo. Os cultivares colombianos são menos tolerantes ao alumínio do que os genótipos brasileiros, exceto o Fedearroz-68, que apresentou a maior tolerância ao Al^{3+} , distinguindo-se dos demais. O índice de tolerância (IT) e o índice de colheita (IC) são variáveis adequadas para distinguir entre cultivares de arroz sensíveis e tolerantes ao alumínio do solo. A saturação por Al^{3+} reduz os teores e acúmulos de N, P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} na massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de arroz.

Palavras-chave: *Oryza sativa*. Solos ácidos. Índice de tolerância.

CONTRERAS, Mario Sandoval. **Behavior of upland rice cultivars in acidic soil of the colombian savanna.** 2015. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

ABSTRACT

Soil Aluminum is a limiting factor of great importance in agricultural food production. New and more productive rice cultivars are released every year, indicating the need to seek new technologies for incorporation of less fertile areas in the production process. For two consecutive years 2014 and 2015, an experiment was carried out in the field of Colombian and Brazilian cultivars of upland rice in the municipality of San Luís de Palenque, Casanare, in the eastern savannas of Colombia. The climate is classified as humid tropical savanna, according to Koppen classification, with an altitude of 250 m. The soil was classified as Oxic Dystrudepts with an average pH of 4.4 and aluminum saturation of 83 %. The experimental design was completely randomized with four replications, the treatments result of an 8x5 factorial, where the factors were 8 rice cultivars (4 Colombian and Brazilian 4) and 5 saturation rates for Al^{3+} (0, 21, 43, 62 and 83 %). The genotypes were: the CNA- 4164 lines (tolerant to aluminum) and CNA- 8521 (sensitive to aluminum) from the active germplasm bank of Embrapa Rice and Beans, IAPAR -9 and IAPAR -177 cultivars, from Brazil and four Colombian commercial cultivars: Fedearroz-68, Fedearroz -174 , Fedearroz -2000 Fedearroz -67. It performed a preliminary test soil incubation with a mixture of $MgCO_3$ with $CaCO_3$ and ratio Ca:Mg = 4: 1 to define the liming and adjust the various saturation rates for aluminum. The following evaluations were made a) Chemical analysis of soil (pH, organic carbon, P, K, Al, Ca, Mg, H+Al) for the evaluation of fertility. b) Chemical analysis of plant tissues: levels and the content of N, P, K, Ca, Mg, c) agronomic variables: plant height, number of tillers, shoot dry mass, aluminum tolerance index, number of plants/m², number of panicles/m², number of filled grains per panicle, number of grains per panicle voids, yield (kg/ha) of grain (14% moisture). The cultivars and lines of upland rice of Brazilian and Colombian origin differ significantly as to the effects of exchangeable aluminum of the soil in their biometric characteristics and phytotechnical parameters. Rice cultivars IAPAR-177 and IAPAR-9 presented tolerance higher than 43% saturation for Al^{+3} in soil CIC. The Colombian cultivars are less tolerant to aluminum than the Brazilian genotypes, except Fedearroz-68, which presented the highest tolerance to aluminum, distinguishing itself from the others. The tolerance index (TI) and the harvest index (CI) are adequate variables to distinguish between sensitive and soil tolerant rice cultivars. The saturation by Al^{+3} reduces the contents and accumulations of N, P, K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} in the MSPA of rice plants.

Key-words: *Oryza sativa* L. acids soils. tolerance index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição relativa das espécies de alumínio de acordo com o pH da solução	24
Figura 2	Formas de complexação do Al^{3+} com a matéria orgânica do solo: (a) pontes de água, (b) atração eletrostática, (c) troca de ligantes e (d) quelação	25
Figura 3.1	Variações médias das temperaturas máxima e mínima e distribuição das precipitações durante os períodos de execução dos experimentos por decêndio nas safras 2014 e 2015. San Luis de Palenque, Casanare, Colômbia	39

LISTA DE TABELAS

ARTIGO A

Tabela 3.1	Resultados das análises químicas do solo das parcelas experimentais após a calagem, antes da instalação do experimento de campo dos anos 2014 e 2015	40
Tabela 3.2	Características granulométricas do solo antes da instalação do experimento de campo dos anos 2014 e 2015	41
Tabela 3.3	Médias de altura de planta (cm) e equação de regressão linear para cultivares/linhagem de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} no solo. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	46
Tabela 3.4	Valores médios para produção de massa seca de parte aérea (MSPA) ($kg\ ha^{-1}$) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	47
Tabela 3.5	Equações de regressão polinomial para produção ($kg\ ha^{-1}$) de massa seca da parte aérea (MSPA) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	48
Tabela 3.6	Valores médios de número de colmos/ m^2 (NC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	49
Tabela 3.7	Equações de regressão polinomial para o número de colmos/ m^2 (NC) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al^{3+} em San Luis de Palenque, Colômbia nas safras 2014 e 2015.....	51
Tabela 3.8	Valores médios para número de panículas/ m^2 (NP) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	51

Tabela 3.9	Equações de regressão polinomial para número de panículas/m ² (NP) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	53
Tabela 3.10	Valores médios para porcentagem de colmos férteis/m ² (PCF) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	54
Tabela 3.11	Funções de regressão linear para porcentagem de colmos férteis (PCF) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	55
Tabela 3.12	Valores médios para número de grãos cheios/panícula (NGC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	56
Tabela 3.13	Funções de regressão linear e polinomial para o número de grãos cheios/ panícula (NGC) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	57
Tabela 3.14	Valores médios e equação de regressão linear para o número de espiguetas chochos/panícula (NECP) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	58
Tabela 3.15	Valores médios de produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al ³⁺ . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	59
Tabela 3.16	Equações de regressão polinomial para produtividade de grãos (PG) (kg ha ⁻¹) de cultivares/linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al ³⁺ , San Luis de Palenque, Colômbia safras 2014 e 2015.....	61

Tabela 3.17	Valores médios para índice de colheita (IC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	62
Tabela 3.18	Funções de regressão polinomial para ajuste da variação do índice de colheita (IC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	63
Tabela 3.19	Valores médios de índice de tolerância (IT) para cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	66
Tabela 3.20	Funções de regressão polinomial para o índice de tolerância (IT) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	67

ARTIGO B

- Tabela 4.1** Resultados médios das análises químicas do solo, na profundidade de 0-20 cm das parcelas experimentais após a calagem, antes das instalações dos experimentos de campo dos anos 2014 e 2015.....74
- Tabela 4.2** Probabilidade do teste F para os teores e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} , safras 2014 e 2015.....79
- Tabela 4.3** Médias gerais e equações de regressão para teor e acúmulo de nitrogênio (N) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, 2014 e 201580
- Tabela 4.4** Valores médios de massa seca de parte aérea (MSPA) ($kg\ ha^{-1}$) de cultivares/linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....81
- Tabela 4.5** Médias gerais de teor e conteúdo de fósforo (P) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 201583
- Tabela 4.6** Equações de regressão polinomial para acúmulo de fósforo ($kg\ ha^{-1}$) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 201584
- Tabela 4.7** Médias gerais e equações de regressão para teores de potássio (K^+) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 201585

Tabela 4.8 Médias gerais e equações de regressão polinomial para o acúmulo de potássio (K^+) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	87
Tabela 4.9 Médias gerais e equações de regressão linear para o teor de (Ca^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.	89
Tabela 4.10 Médias gerais e equações de regressão linear para o teor de (Mg^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) das plantas de arroz de cultivares brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	90
Tabela 4.11 Médias gerais e equações de regressão para o acúmulo de (Ca^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	92
Tabela 4.12 Médias gerais e equações de regressão polinomial para o acúmulo de (Mg^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia nas safras 2014 e 2015.....	93
Tabela 4.13 Coeficiente de correlação de Pearson entre a produtividade de grãos, e o acúmulo individual de nutrientes na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos cultivados em solo com diferentes saturações por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.....	95

Tabela 4.14 Valores médios de produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) de cultivares/linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al ³⁺ em San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015	95
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	TOXIDEZ POR ALUMÍNIO	20
2.2	O ALUMÍNIO TROCÁVEL DO SOLO	22
2.2.1	Especiação Química do Alumínio No Solo	23
2.2.2	Complexação do Alumínio pela Matéria Orgânica do Solo.....	24
2.2.3	Emprego da Calagem.....	26
2.3	ALUMÍNIO E O CRESCIMENTO VEGETAL	27
2.3.1	Efeitos do Alumínio nas Plantas	27
2.4	ALUMÍNIO E A PLANTA DE ARROZ.....	29
2.4.1	Mecanismos de Tolerância e Exclusão do Alumínio Tóxico	31
2.4.2	Avaliação de Genótipos Tolerantes ao Alumínio	32
3	ARTIGO A: TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ (<i>Oryza sativa</i>, L) SEQUEIRO AO ALUMÍNIO DO SOLO	34
3.1	RESUMO.....	34
3.2	ABSTRACT	35
3.3	INTRODUÇÃO	36
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	38
3.4.1	Descrição de Cultivares.....	43
3.4.1.1	Fedearroz-68	43
3.4.1.2	Fedearroz-67	43
3.4.1.3	Fedearroz-174	43
3.4.1.4	Fedearroz-2000	44
3.4.1.5	Iapar-9	45
3.4.1.6	Linhagens CNA-4164 e CNA-8521	45
3.4.2	Análises Estatística.....	45
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.6	CONCLUSÕES	68

4	ARTIGO B: COMPORTAMENTO NUTRICIONAL DE CULTIVARES DE ARROZ DE SEQUEIRO EM SOLOS COM DIFERENTES SATURAÇÕES POR ALUMÍNIO	69
4.1	RESUMO.....	69
4.2	ABSTRACT	70
4.3	INTRODUÇÃO	71
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	72
4.4.1	Descrição de Cultivares.....	75
4.4.1.1	Fedearroz-68	75
4.4.1.2	Fedearroz-67	76
4.4.1.3	Fedearroz-174	76
4.4.1.4	Fedearroz-2000	77
4.4.1.5	Iapar-9	77
4.4.1.6	Linhagens CNA-4164 e CNA-8521	77
4.4.2	Análises Estatística.....	78
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.6	CONCLUSÕES	95
5	CONCLUSÕES GERAIS	96
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

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

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

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

Os cultivares de arroz de sequeiro são mais rústicos e apresentam grande adaptação a diferentes condições ambientais, mas por outro lado, são menos produtivos. Esta situação gera a necessidade de busca constante por genótipos com algum nível de tolerância ao alumínio ou a outras restrições químicas do substrato de cultivo. Nesse processo se busca obter novos materiais que possam viabilizar a produção de alimentos em áreas de solos ácidos de baixa fertilidade, onde não é economicamente viável o uso da irrigação.

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

De maneira geral, as plantas diferem bastante quanto ao grau de tolerância à acidez do solo. As espécies apresentam características genéticas que determinam variações intra e interespecíficas quanto a tolerância ao alumínio e, conseqüentemente, apresentam também variações de magnitude quanto às respostas ao controle, tanto da acidez quanto da presença do alumínio trocável no solo.

Avaliar e conhecer as características genéticas das plantas é fundamental para se recomendar o uso racional e econômico da calagem. Para o cultivo do arroz não é diferente, razão pela qual se busca sempre identificar cultivares que sejam mais adaptados e produtivos em áreas de solos com algum grau de acidez, dispensando a necessidade de correção via calagem.

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

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

Dessa forma, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento de cultivares de arroz de sequeiro brasileiros e colombianos em solo com diferentes valores de saturação por alumínio.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 TOXIDEZ POR ALUMÍNIO

A toxidez por alumínio (Al^{3+}) é o fator mais limitante da produtividade agrícola em solos ácidos, que cobrem uma área aproximada de 40% da superfície terrestre distribuída em várias regiões do globo terrestre (MA; RYAN; DELHAIZE, 2001; KOCHIAN et al., 2004), e representam cerca de 70% dos solos potencialmente cultiváveis do mundo (PIÑEROS et al., 2002; KOCHIAN, 1995). Aproximadamente 60% das áreas com solos ácidos estão localizadas em regiões tropicais e subtropicais, onde se encontram países em desenvolvimento, que apresentam grandes limitações para produzir os alimentos demandados pelas populações locais (KOCHIAN et al., 2004).

O Al^{3+} é um componente do solo que representa 7,1% da massa da crosta terrestre e é o terceiro elemento mais abundante depois do oxigênio e do silício. Ele faz parte dos minerais primários, como feldspatos e micas, de minerais secundários alumino-silicatados, como a caulinita, haloisita e imagolita, e de óxidos de Al como a gibbsita (WRIGTH, 1989). A dissolução destes minerais, primários e secundários, em solos ácidos liberam o Al^{3+} para solução dos solos e sua concentração depende do pH do solo, da quantidade e tipo de minerais que contêm Al, do equilíbrio com as superfícies de troca e das reações de complexação com a matéria orgânica (LINDSAY; WALTHALL, 1995).

A acidez é a característica do solo que mais inibe o crescimento das plantas em muitas partes do mundo. Essa inibição resulta da combinação de fatores que incluem a toxidez por alumínio, manganês e hidrogênio, e a deficiência de nutrientes, particularmente, cálcio, magnésio, fósforo e molibdênio (WRIGTH, 1989). Porém, em áreas de solo com valores de pH menores que 5,0, o Al^{3+} normalmente, é considerado o principal fator limitante (FOY, 1988).

A produção vegetal depende de uma complexa interação entre o genótipo da planta e as condições ambientais. Entendê-las permite ao homem desenvolver técnicas alternativas de melhoramento vegetal, de manejo do solo e do ambiente que permitem elevar a produtividade das culturas (FLOSS, 2004). De acordo com Fageria e Stone (1999), dos fatores ambientais, o manejo do clima apresenta maior complexidade e é praticado em pequenas áreas. O solo, em

compensação, pode ser facilmente modificado nas suas camadas superficiais, alterando-se as propriedades físicas, químicas e biológicas, com objetivo de minimizar os efeitos de fatores de estresses que possam inibir a expressão do potencial produtivo das culturas exploradas economicamente pelo homem.

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

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

Estima-se que aproximadamente 3,95 bilhões de hectares de terras agricultáveis do mundo, sejam afetadas pela acidez (VON UEXKULL; MUTERT, 1995). Solos com esta característica ocorrem principalmente nas regiões tropicais e são considerados de aproveitamento marginal e de difícil adaptação à exploração agrícola. Na maioria destes solos a toxidez causada pelo alumínio trocável é um dos fatores que mais limita a exploração agrícola para fins de produção de alimentos (KOCHIAN; JONES, 1997), logo a seleção de cultivares tolerante ou resistente à acidez e a este elemento químico é o procedimento mais adequado para superar estas restrições (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988).

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

Segundo Sanz et al. (1999) os solos das áreas que representam a altillanura, são classificados principalmente como oxisoils (Tropeptic Haplustox hypertermic) que apresentam valores de pH em torno de 4,50, baixa disponibilidade de bases e alta saturação por Al^{3+} (até 75%). Além disso, são solos muito suscetíveis à degradação física e sob condições naturais não são adequados para a produção de culturas e pastagens (AMÉZQUITA, 1998).

No mundo, e no Brasil em particular, os solos ácidos para serem incorporados ao processo produtivo, necessitam de uma correção via calagem, para neutralização do alumínio tóxico e adição de cálcio e magnésio, e de uma fertilização complementar, para adição de fósforo e outros nutrientes. Nesses solos, para obter e manter a alta produtividade das culturas, é também de fundamental importância a adoção de técnicas de manejo que visem aumentar e conservar o conteúdo de matéria orgânica (NOVAIS et al., 2007).

2.2 O ALUMÍNIO TROCÁVEL DO SOLO

A determinação do Al^{3+} utilizada em laboratórios de análise de terra para fins de avaliação da fertilidade do solo quantifica as formas trocáveis do elemento (Al^{3+}), extraídas com uma solução de KCl 1 mol L^{-1} , mas não seleciona as formas tóxicas para as plantas. O Al pode estar na forma livre, complexado com hidróxidos (AlOH^{2+}), $\text{Al}(\text{OH})_2^+$; $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, com sulfato (AlSO_4^+), com fluoreto (AlF^{2+}), com fosfato ($\text{AlH}_2\text{PO}_4^{2+}$), com ligantes orgânicos (Al-orgânicos) e, também pode estar na forma de polímeros (polinúcleos de Al). A soma dessas formas químicas representa o conteúdo total do Al trocável do solo (BLOMM; ERICH, 1996).

A quantidade de Al complexado com outros ligantes inorgânicos e orgânicos depende da concentração desses ligantes na solução do solo e da constante de equilíbrio (K^0) do complexo. Os complexos com ligantes inorgânicos seguem a ordem decrescente de estabilidade $\text{AlF}^{2+} > \text{AlSO}_4^+ > \text{AlH}_2\text{PO}_4^{2+}$ tendo-se o $\log K^0$ de 6,98, 3,50, e 3,10, respectivamente (LINDSAY; WALTHALL, 1995), enquanto os ligantes orgânicos apresentam grande variação na estabilidade do complexo, devido às diferenças estruturais e de grupos funcionais existente entre eles (SALET, 1998).

A solubilidade do Al^{3+} no solo e, conseqüentemente, sua toxidez são influenciadas por vários fatores, incluindo pH, tipo de argila predominante, concentração de sais na solução e teor de matéria orgânica do solo (FOY, 1974; SILVA, 1997).

O aproveitamento agrícola dos solos ácidos é limitado pela presença do Al^{3+} trocável, principalmente quando o seu pH é menor que 5.0, situação em que a solubilidade do elemento aumenta acentuadamente, podendo ocupar mais de 50% das cargas negativas que representam a CTC do solo (EVANS; KAMPRAHT, 1970).

O Al^{3+} influencia diretamente o crescimento do sistema radicular reduzindo a sua capacidade de absorção de água e nutrientes, e como consequência reduz também o crescimento da parte aérea das plantas sensíveis (POSCHENRIEDER et al., 2008). Especificamente no caso do fósforo ocorre uma reação de precipitação com o Al tornando-o menos solúvel, e indisponível para as plantas (SCHAFFERT et al., 2001).

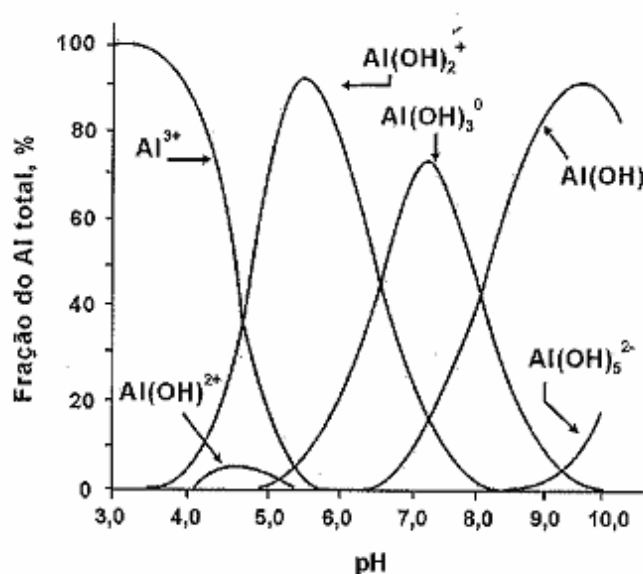
O Al^{3+} é mais fortemente atraído pelas cargas negativas das partículas do solo em detrimento ao potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Isso ocorre porque o Al^{3+} é um íon trivalente positivo, portanto apresenta maior quantidade de carga. Dessa forma, o Al^{3+} permanece ligado aos colóides do solo, enquanto outros cátions tendem a serem desorvidos, sendo deslocados para solução do solo onde são absorvidos pelas raízes das plantas, pelos microrganismos ou são lixiviados junto com a água de percolação para camadas mais inferiores no perfil do solo. Por esse motivo os solos tropicais têm alta concentração de Al^{3+} e baixa de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ (BOHNEN, 2000). Freitas et al. (2006) observaram significativa redução da absorção de P, Mg^{2+} , Ca^{2+} e K^+ por genótipos de arroz cultivados sob estresse por Al^{3+} .

2.2.1 Especificação Química do Alumínio no Solo

O Al^{3+} livre é coordenado por seis moléculas de água em uma configuração octaédrica ($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$) e é denominado Al^{3+} (WRIGHT, 1989). Com o aumento do pH da solução, as moléculas de água da esfera de hidratação perdem H^+ , numa reação química chamada de hidrólise do íon Al, alterando a valência do íon em solução (BERTSCH; PARKER, 1995). A distribuição das formas de Al^{3+} em função do pH indica predominância da forma Al^{3+} em valores menores que 4,7

(Figura 1). Próximo ao pH=5,0 ocorre um equilíbrio na magnitude de atividade entre as espécies (Al^{3+} , Al(OH)^{2+} e Al(OH)_2^+). Na presença de outros ânions em solução essa distribuição é modificada dependendo do tipo de ânion e de sua constante de equilíbrio de ligação com o Al (BERTSCH; PARKER, 1995). De acordo com Foy (1974), a severidade da toxidez do Al^{3+} dependente do valor de pH do solo e torna-se praticamente nula em solos com $\text{pH}>5,5$.

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



Fonte: Marion et al. (1976)

2.2.2 Complexação do Alumínio pela Matéria Orgânica do Solo

A matéria orgânica do solo pode ser dividida em dois grandes grupos: as biomoléculas orgânicas (liberadas pela decomposição microbiana ou excretada pelas raízes) e as substâncias húmicas (SPOSITO, 1989). As biomoléculas são ligantes orgânicos solúveis de vida curta no solo, porém, são produzidos durante todo período de atividade microbiana ou radicular.

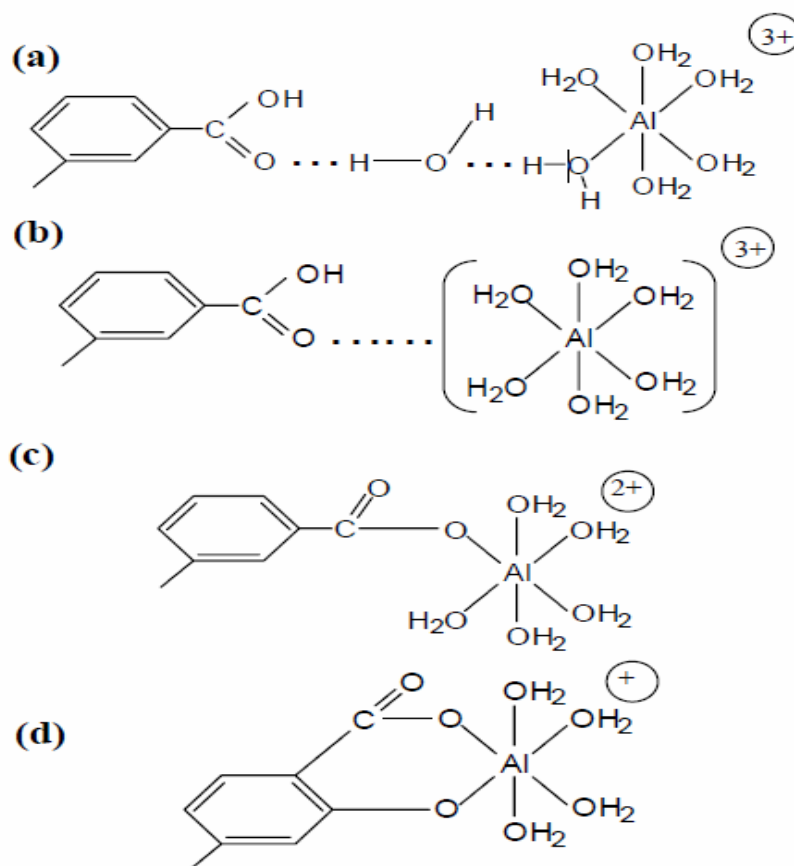
As substâncias húmicas ou húmus do solo podem ser divididos em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas, que se caracterizam por serem componentes com altos pesos moleculares e geralmente insolúveis em água.

Os ácidos fúlvicos são componentes orgânicos de menor peso molecular normalmente solúveis, que podem formar complexos com o Al^{3+} na

solução do solo. Os ácidos húmicos e a huminas podem adsorver o Al^{3+} , principalmente em ambientes onde estas substâncias se encontram em altas concentrações (VANCE; STEVENSON; SIKORA, 1995).

A habilidade das substâncias húmicas em formar complexos estáveis com o Al^{3+} está ligada ao conteúdo de grupos funcionais que contêm oxigênio (O_2), como os radicais carboxílicos, fenólicos, enólicos e alcoólicos, e grupos que contêm nitrogênio (N) (VANCE; STEVENSON; SIKORA, 1995). A ligação do Al^{3+} com os ligantes orgânicos pode ocorrer por pontes de água (Figura 2A), atração eletrostática (Figura 2B), troca de ligantes com apenas um grupo doador (Figura 2C) e quelação (mais de um grupo doador) (Figura 2D). As formas de ligações fortes com Al^{3+} (troca de ligantes e quelação) devem ocorrer em ambientes com altos conteúdos de substâncias húmicas (VANCE; STEVENSON; SIKORA, 1995).

Figura 2 – Formas de complexação do Al^{3+} com a matéria orgânica do solo: (a) pontes de água, (b) atração eletrostática, (c) troca de ligantes e (d) quelação.



O comportamento químico do Al^{3+} no solo depende do conteúdo de MO, cujas frações lábeis e humificadas dependem diretamente do sistema de manejo adotado (BAYER; MARTIN-NETO; SAAB, 2003) e da composição mineralógica do mesmo (OADES; GILLMANP; UEHARA, 1989). Os compostos orgânicos podem formar complexos com cátions metálicos, com a superfície de óxidos e com hidróxidos de Fe e de Al^{3+} , havendo assim uma espécie de competição entre eles (OADES; GILLMANP; UEHARA, 1989).

2.2.3 Emprego da Calagem

Diversas estratégias têm sido empregadas para o manejo dos solos ácidos, entre elas pode se destacar: i) incorporação ao solo de resíduos orgânicos decompostos visando promover pequenos aumentos no pH e complexação do Al^{3+}

(HAYNES, 1993), ii) aplicação de materiais alcalinos a base de carbonatos, óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio para elevar o pH do solo e converter o Al^{3+} para formas menos tóxicas (RESENDE, 2004), iii) seleção de genótipos com algum nível de tolerância ao Al^{3+} tóxico (KIM et al., 2001).

A calagem do solo é a recomendação técnica mais eficiente para neutralizar e reduzir a toxicidade do Al^{3+} dos solos ácidos, permitindo a incorporação de grandes áreas de uma determinada região ao processo produtivo. Além disso, a calagem deve corrigir a toxidez causada por Al^{3+} , Fe e Mn^{2+} e adicionar quantidades apreciáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao solo (AZEVEDO; KÄMPF; BOHNEN, 1996; MIRANDA; MIRANDA, 2000), eliminando fatores de estresse nutricional à cultura de arroz (DUARTE; VOLTAN; FURLANI, 1999). Entretanto, tem que se considerar, como destacado por Foy (1984), que a calagem não é uma técnica adequada para neutralizar o Al^{3+} e corrigir os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} das camadas mais profundas do solo.

O arroz mesmo sendo considerada como espécie adaptada às condições de solos ácidos (FAGERIA, 2000), há grandes diferenças entre os cultivares e genótipos em termos de resposta à calagem ou quanto à tolerância ao Al^{3+} (FAGERIA, 1982; FERREIRA; SALGADO; JORGE, 1986).

Dentre os cultivares brasileiros de arroz, Ferreira, Salgado e Jorge (1986) classificaram o 'IAC 47' como tolerante ao Al^{3+} e não responsivo à calagem, enquanto o 'IAC 164' foi considerado sensível ao Al^{3+} e responsivo à calagem do

solo. Por outro lado, Furlani e Furlani (1991) classificaram estes cultivares como eficientes na utilização do P e tolerantes ao Al^{3+} .

2.3 ALUMÍNIO E O CRESCIMENTO VEGETAL

2.3.1 Efeitos do Alumínio nas Plantas

A toxidez do Al^{3+} está associada a um grande número de processos fisiológicos e metabólicos. O Al^{3+} é muito reativo, com forte afinidade de ligação com proteínas, fosfatos inorgânicos, ácidos nucleicos (DNA e RNA), ácidos carboxílicos, fosfolípidios, flavonoides e antocianinas (DELHAIZE; RYAN, 1995). O Al^{3+} também interfere na peroxidação de lipídeos (YAMAMOTO; HOBAYASHI; MATSUMOTO, 2001) e estresses oxidativos.

O Al^{3+} promove alterações na permeabilidade da membrana plasmática, influenciando a passagem de íons tanto para o interior das células quanto para seu exterior (KOCHIAN, 1995; AHN et al., 2001; YAMAMOTO; HOBAYASHI; MATSUMOTO, 2001). Isso ocorre porque o Al^{3+} forma ligações com compostos de oxigênio, podendo interagir com sítios no apoplasto e simplasto nas raízes. Dessa forma, a interação com essas substâncias é importante para minimizar a ação tóxica do alumínio (MA; RYAN; DELHAIZE, 2001).

Sintomas de toxicidade de Al^{3+} ocorrem tanto nas células como nos órgãos vegetais (TAYLOR, 1995), porém, a inibição do crescimento da parte aérea e, particularmente do sistema radicular, são os efeitos mais frequentemente relatados (FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; DELHAIZE; RYAN, 1995). A redução do crescimento radicular é o sintoma mais facilmente reconhecido (DELHAIZE; RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995). Para Zhang e Taylor (1988), um importante sintoma precoce da fitotoxicidade de Al^{3+} é a inibição da elongação radicular. Conseqüentemente, as raízes se tornam pouco eficientes na absorção de água e nutrientes, especialmente da camada subsuperficial do solo (KOCHIAN, 1995; BRONDANI; PAIVA, 1996; MISTRO; CAMARGO; PETTINELLI-JUNIOR, 2001; MENDONÇA, 2003; WANG et al., 2006).

Os sintomas visuais da toxicidade de Al^{3+} na parte aérea de algumas plantas se assemelham aos sintomas ligados à deficiência de P (redução geral do crescimento, folhas pequenas de coloração verde escuras, com maturidade tardia e

ramos com coloração purpúrea), ao passo que, em outras, assemelham-se a uma deficiência de Ca^{2+} (enrolamento das folhas jovens e colapso do ápice dos pecíolos) (FOY, 1983).

O Al^{3+} normalmente acumula-se no sistema radicular das plantas, com pequena translocação para a parte aérea (BEUTLER; FERNANDES; FAQUIN, 2001). Os danos causados no sistema radicular têm como consequência imediata uma redução na absorção de água e nutrientes e segundo Matsumoto (2000) afetará indiretamente o crescimento da parte aérea das plantas.

Plantas afetadas pela toxidez do Al^{3+} frequentemente apresentam sintomas de deficiência de diferentes nutrientes, tais como P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Mo, devido a interferência deste elemento nos processos de absorção, transporte e uso daqueles nutrientes (FOY, 1974; LIU; LUAN, 2001). Com isso haverá retardamento do crescimento da planta como um todo, o que pode levar a ocorrência de folhas pequenas, escuras e com maturidade precoce, além do encurtamento dos internódios.

Elevadas concentrações de Al^{3+} também podem induzir a deficiência de Fe em arroz, sorgo e trigo (CLARK et al., 1981; FURLANI; CLARK, 1981). Tais deficiências ocorrem porque o Al^{3+} induz a deposição de calose nos canais plasmodesmáticos, inibindo fisicamente o transporte simplástico entre as células (SIVAGURU et al., 2000).

Outro efeito prejudicial do Al^{3+} está associado à mudança na homeostase celular do Ca^{2+} e na competição por canais de transporte do Ca^{2+} . A inibição da absorção celular de Ca^{2+} pelo Al^{3+} afeta vários processos celulares como: mitose, citocinese, gravitropismo, crescimento polar, corrente citoplasmática e sinalização celular (HUANG et al., 1996; ZHANG; RENGEL, 1999).

Apesar da grande evolução no entendimento sobre os efeitos negativos do Al^{3+} , ainda não se conhece com exatidão as bases bioquímicas da fitotoxidez (KOCHIAN, 2004). Nas células, principalmente das raízes, pode ocorrer danos na parede celular, membrana plasmática, citoesqueleto e núcleo celular. Pois, de acordo com Silva et al. (2000) e Taylor et al. (2000), é no apoplasto das raízes que ocorre a maior concentração de Al^{3+} nas plantas.

2.4 ALUMÍNIO E A PLANTA DE ARROZ

Apesar de o arroz ser considerado por muitos autores (KIKUI et al., 2005; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006) como planta tolerante ao alumínio, na realidade há uma grande variação entre cultivares, incluindo entre eles aqueles muito sensíveis (MATSUMOTO, 2000), que podem ter seu crescimento impedido ou diminuído quando cultivados na presença do Al^{3+} (MENDONÇA, 2003; FREITAS et al., 2006), e ainda ter o crescimento do sistema radicular limitado aos primeiros 10 cm da camada superficial do solo onde se concentra a matéria orgânica (KOCHIAN, 1995).

De acordo com Okada, Fischer e Perez (2003), a redução de produtividade dos cultivares sensíveis em áreas de solos ácidos e de baixa CTC foi positivamente correlacionada com os teores de Ca^{2+} do solo. Isto sugere que para estes cultivares há necessidade de fazer a correção do solo mediante adoção da prática da calagem, uma vez que a aplicação de calcários além de neutralizar o alumínio tóxico, aumenta os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} do solo.

A deficiência de Mg^{2+} comum em arrozais cultivados em solos ácidos, de acordo com Huang et al. (2009) está associada à inibição da absorção deste nutriente pelo alumínio que bloqueia as proteínas de membranas responsáveis pelo transporte do Mg^{2+} para o interior das células (MATSUMOTO, 2000). Esta inibição pode ser atenuada pela adubação com Mg^{2+} Yang et al. (2007), mas a solução definitiva poderia ser obtida com a prática da calagem utilizando um calcário adequado para suprir o solo com esse nutriente.

Em genótipos de arroz sensíveis ao Al^{3+} , a presença desse elemento no substrato de crescimento induziu indiretamente a um estresse hídrico e fechamento dos estômatos (PALIWAL; SIVAGURU, 1994). Para Macedo, Kinet e Van Sint (1997) o Al^{3+} promove necroses, reduções do comprimento das folhas, da área foliar, da atividade fotossintética e do crescimento da parte aérea das plantas de arroz.

Ainda não há consenso entre os pesquisadores acerca dos parâmetros mais adequados para indicar a tolerância de cultivares de arroz ao Al^{3+} (HAI et al., 1993; MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a). Mais, de acordo com Fageria e Baligar (1994) e Carver e Ownby (1995), a definição destas variáveis deve ser perseguida como forma de acelerar e

facilitar as investigações científicas para a busca de novos genótipos de arroz tolerantes a esse elemento.

Outros estudos indicam que a toxidez do Al^{3+} além de reduzir o crescimento do sistema radicular, reduz também a absorção e utilização de nutrientes e o tamanho da parte aérea (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988; FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; ROSSIELLO et al., 1995). Ao usarem esses sintomas e efeitos como indicadores de sensibilidade ou resistência de cultivares ao Al^{3+} os resultados têm sido diversos. Fageria, Baligar e Wright (1989) consideraram que a produção de massa seca da parte aérea e das raízes foi mais suscetíveis à toxidez de Al^{3+} que o comprimento radicular ou altura da planta de arroz.

De acordo com Jan e Pettersson (1989) para plantas de arroz cultivadas na presença e na ausência de Al^{3+} a produção relativa de massa seca da parte aérea foi melhor indicadora de sensibilidade ao Al^{3+} que a produção relativa de massa seca de raízes ou o comprimento radicular relativo. Para Mendonça (1991), que trabalhou com 50 genótipos de arroz de sequeiro, a produção relativa de massa seca total e a área radicular foram os indicadores mais apropriados para agrupar os cultivares em cinco classes de tolerância. Outros autores têm enfatizado que o comprimento radicular seja a característica mais adequada na diferenciação de cultivares de arroz quanto à tolerância ao Al^{3+} (HOWELER; CADAVID, 1976; FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979; FURLANI; HANNA, 1984).

No processo de seleção de cultivares de arroz deve-se considerar a sensibilidade diferencial dos cultivares aos níveis ou teores de Al^{3+} do substrato de crescimento. Para alguns cultivares, baixas concentrações de Al^{3+} na solução nutritiva estimula o crescimento das plântulas (FOY; DUKE; DEVINE, 1992; FREIRE et al., 1987), mas altas concentrações promovem severas reduções (FAGERIA, 1982; ROSSIELLO et al., 1995).

No entanto, para alguns cultivares, os efeitos positivos do aumento de doses de Al^{3+} no acúmulo de massa seca pela planta de arroz parecem ser devidos ao bloqueio das superfícies negativas da parede celular pelo Al^{3+} favorecendo a absorção de ânions, principalmente NO_3^- e $H_2PO_4^{2-}$ (FREIRE et al., 1987). Fageria, Wright e Baligar (1989) sugeriram que o efeito benéfico está relacionado a um aumento na absorção de nutrientes pelas plantas de arroz, enquanto que Hai et al. (1993) o atribuíram à entrada passiva de Al^{3+} e fosfato na forma de um complexo de baixa carga positiva nas raízes da planta de arroz.

Cultivares modernos de arroz de terras altas são menos tolerantes ao Al^{3+} em comparação a cultivares tradicionais (JUSTINO et al., 2006), provavelmente devido ao processo de seleção deste cultivares. No Brasil e na Colômbia são raros os relatos com descrição detalhada dos novos cultivares de arroz quanto a sensibilidade ao Al^{3+} . Na maioria dos casos há apenas descrições visuais a campo para cultivares já lançados. Guimarães et al. (2006), apresentaram uma descrição das linhagens pertencentes ao banco de germoplasma da EMBRAPA, indicando o grau de sensibilidade das mesmas ao Al^{3+} . Além disso, existem apenas avaliações restritas a baixo número de cultivares como aquelas realizadas por Mendonça (2003) e Justino et al. (2006). Portanto, ainda há a necessidade de fazer a uma descrição detalhada dos cultivares modernos de arroz quanto a tolerância ou sensibilidade ao Al^{3+} , principalmente daqueles utilizados em grande escala por agricultores brasileiros e colombianos.

2.4.1. Mecanismos de Tolerância e Exclusão do Alumínio Tóxico

O desenvolvimento de métodos rápidos, eficientes e de baixo custo operacional para avaliação de plantas tolerantes à toxicidade de Al^{3+} é de extrema importância, pois permite aceleração dos programas de melhoramento genético (FURLANI, HANNA, 1984; LITTLE, 1988). Técnicas de seleção para tolerância ao Al^{3+} normalmente se baseiam na exposição de plântulas ao Al^{3+} em solução nutritiva ou em solo e subsequentes medições da inibição do crescimento radicular (HORTS; KLOTZ, 1990).

Existem métodos rápidos de laboratório e de casa de vegetação que podem ser utilizados na seleção de cultivares de diferentes plantas quanto a tolerância ao Al^{3+} . Normalmente não são destrutivos e podem ser empregados em estádios precoces de desenvolvimento das plantas (CARVER; OWNBY, 1995).

Há fortes evidências de que a tolerância ao Al^{3+} em genótipos trigo, milho e arroz, ocorre pela exclusão do Al^{3+} das células pela síntese de ácidos orgânicos capazes de quelar o Al^{3+} (KOCHIAN et al., 2002; WATANABE; OSAKI, 2002).

A produção de ácidos orgânicos ativada pelo Al^{3+} tem sido descrita em monocotiledôneas e dicotiledôneas como mecanismo de resposta de tolerância a esse elemento. Em trigo, o Al^{3+} estimula a exudação de malato, já em sorgo, tabaco

e soja o Al^{3+} estimula a síntese de citrato (KOCHIAN et al., 2004).

Os mecanismos de tolerância celular ou detoxificação interna do Al^{3+} tem sido menos estudado do que os mecanismos de exclusão do Al^{3+} . Entretanto, o mecanismo envolvido com o acúmulo de Al^{3+} no interior das células foi associado com a ligação de ácidos fenólicos e ácidos orgânicos, sendo que são frequentemente capturados em células especializadas, semelhantes às células da epiderme das folhas (MA; FURUKAWA, 2003).

De acordo com Scott, Fisher e Spohr (1992), um método de seleção ideal deve ter as seguintes características: i) alta correlação entre os resultados da seleção em ambiente controlado e a performance no ambiente alvo; ii) possibilitar o trabalho com grandes populações; iii) diferenciar os genótipos estudados; iv) elevada reprodutibilidade de resultados e v) não ser destrutivo.

2.4.2 Avaliação de Genótipos Tolerantes ao Alumínio

Ainda há divergências quanto às melhores características da planta que podem ser utilizadas como medidas para identificar a tolerância ao Al^{3+} (MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997). Os métodos de seleção utilizados variam amplamente entre programas que pesquisam fontes e concentrações de Al^{3+} , pH do substrato, meios de crescimento e características da planta que são avaliadas (FOY; DUNCAN; WASKOM, 1993).

Um grande número de técnicas tem sido empregadas para identificação de plantas tolerantes ao Al^{3+} tóxico. Dentre elas podem ser destacadas: a capacidade do material alterar o pH do meio de cultivo (KOCHIAN, 1995); a observação visual do desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular (DEVINE et al., 1976); a produção de massa seca do sistema radicular e da parte aérea (LAFEVER; CAMPBELL, 1978); a coloração das raízes seminais em solução contendo hematoxilina (POLLE; KONZAK; KITTRICK, 1978), e a produção final de grãos (HOWELER; CADAVID, 1976).

O método direto de seleção para tolerância à acidez do solo consiste em avaliar a produção econômica da cultura sob condições de campo. O resultado é uma média integrada da tolerância expressa durante o desenvolvimento da planta (CARVER; OWNBY, 1995). As avaliações de campo podem envolver a seleção de plantas individuais, a identificação de linhagens promissoras ou a avaliação de

novos materiais antes da liberação de cultivares comerciais (SCOTT; FISCHER; SPOHR, 1992).

Experimentos de campo, embora necessários para a avaliação da tolerância de plantas à acidez dos solos, são muitos trabalhosos, demorados e os resultados são afetados pelas variabilidades intrínsecas de cada solo (URREA-GÓMEZ; CEBALLOS; PANDEY, 1996) e pela resistência diferencial dos cultivares ao ataque de pragas e doenças. Além disso, há dificuldades para isolar os efeitos do excesso de Al^{3+} de outros componentes da acidez do solo (HORTS; PUSCHEL; SCHMOHL, 1997).

A identificação da tolerância ao Al^{3+} tóxico baseado no crescimento de plantas em solos ácidos com níveis tóxicos de Al^{3+} trocável já foi verificada para alfalfa (DEVINE et al., 1976); cevada (FOY, 1996a), sorgo (FOY; DUNCAN; WASKOM, 1993), trigo (FOY, 1996b) e arroz (KHATIWADA et al., 1996; FAGERIA, 2000). Diferentes solos ácidos com pH similar podem variar enormemente quanto aos valores de saturação por Al^{3+} . O crescimento de trigo em solos ácidos é mais dependente da saturação por Al^{3+} e de outros minerais tóxicos como o manganês, do que o próprio pH (JOHNSON JUNIOR; CARVER; BALIGAR, 1997).

Os principais inconvenientes da utilização das condições naturais de campo com solos ácidos, para a discriminação da tolerância ao Al^{3+} podem ser atribuídos a: i) dificuldades na definição precisa dos níveis de Al^{3+} do solo, ii) dificuldades do controle quantitativo e da dinâmica do Al^{3+} no solo; iii) impossibilidade de assegurar que somente o Al^{3+} está disponível para as plantas e não outros metais tóxicos como o manganês (KERRIDGE; DAWSON; MOORE, 1971).

Na classificação de cultivares de arroz para tolerância ao Al^{3+} , Jan e Petterson (1989) relataram que a massa fresca relativa da parte aérea das plantas foi mais adequada que a do sistema radicular devido aos severos danos causados às raízes, independentemente da sensibilidade das cultivares ao Al^{3+} . Contudo, Macedo, Kinet e Van Sint. (1997) acreditam que apenas um parâmetro morfológico isolado não pode ser utilizado como critério para distinção de graus de sensibilidade de plantas de arroz ao Al^{3+} .

3 ARTIGO A

TOLERÂNCIA DE CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa*, L) DE SEQUEIRO AO ALUMÍNIO DO SOLO

3.1 RESUMO

A cada ano genótipos de alto rendimento são desenvolvidos ampliando o potencial produtivo da cultura de arroz. Isso indica a necessidade de busca por novas tecnologias para adaptação destes genótipos ou cultivares as mais diversas condições de clima e solo, incluindo nesse contexto áreas marginais constituídas de solos de baixa fertilidade, característicos de regiões tropicais. Durante dois anos consecutivos, 2014 e 2015, no município de San Luís de Palenque, Casanare, nas savanas orientais da Colômbia, foram instalados dois experimentos em ambiente de campo com cultivares de arroz de sequeiro em um solo classificado como Oxic Dystrudepts com diferentes saturações por Al^{3+} , objetivando avaliar o comportamento de cultivares de arroz de sequeiro, desenvolvidos na Colômbia e no Brasil. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos testados resultaram de um fatorial 8x5 em que os fatores foram oito linhagens/cultivares de arroz (quatro brasileiros e quatro colombianos) e cinco saturações por Al^{3+} (0, 21, 43, 62 e 83%). Após a colheita foram feitas as seguintes avaliações: a) análises químicas do solo (pH, carbono orgânico, P, K, Al, Ca, Mg, H+Al), b) variáveis biométricas: altura de planta (AP), massa seca da parte aérea (MSPA), número de colmos por m^2 , número de panículas por m^2 , porcentagem de colmos férteis, número de grãos cheios e espiguetas chochas por panícula, índice de tolerância (IT), índice de colheita (IC) e produtividade (kg/ha) de grãos (13% de umidade). Os cultivares e linhagens de arroz de sequeiro de origem brasileira e colombiana diferem significativamente quanto aos efeitos do Al^{3+} trocável do solo nas suas características biométricas e parâmetros fitotécnicos. Os cultivares de arroz IAPAR-177 e IAPAR-9 apresentam tolerância superior à 43% de saturação por Al^{3+} na CTC do solo. Os cultivares colombianos são menos tolerantes ao Al^{3+} do que os genótipos brasileiros, exceto o Fedearroz-68, que apresentou a maior tolerância ao Al^{3+} , distinguindo-se dos demais. O índice de tolerância (IT) e o índice de colheita (IC) são variáveis adequadas para distinguir cultivares de arroz, sensíveis e tolerantes, ao alumínio trocável do solo.

Palavras-chave: Saturação por Al^{3+} . Índice de tolerância. Solos ácidos.

TOLERANCE OF CULTIVARS OF UPLAND RICE (*Oryza sativa*, L) TO SOIL ALUMINUM

3.2 ABSTRACT

Each year high yield genotypes are developed by expanding the productive potential of the rice crop. This indicates the need to search for new technologies to adapt these genotypes or cultivars to the most diverse climatic and soil conditions, including in this context marginal areas composed of low fertility soils characteristic of tropical regions. During two consecutive years 2014 and 2015, two experiments were carried out in the rural environment of the upland rice cultivars in a soil classified as Oxic Dystrudepts with different saturation for Al^{3+} , in the municipality of San Luis de Palenque, Casanare, in the eastern savanas of Colombia, aiming evaluate the behavior of upland rice cultivars, developed in Colombia and Brazil. The experimental design was a completely randomized design with four replications. The tested treatments resulted from an 8x5 factorial in which the factors were eight rice cultivars/lines (four Brazilians and four Colombians) and five saturations for Al^{3+} (0, 21, 43, 62 and 83%). After the harvest, the following evaluations were performed: a) soil chemical analyzes (pH, organic carbon, P, K, Al, Ca, Mg, H + Al, Mn) for fertility evaluation, b) biometric variables: plant height (AP), shoot dry weight (MSPA), number of stalks per m^2 , number of panicles per m^2 , percentage of fertile stalks, number of full grains and spikelet's per panicle, index of tolerance (IT), grain harvest index (GHI) and grain yield (kg/ha) (13% moisture). The cultivars and lines of upland rice of Brazilian and Colombian origin differ significantly as to the effects of Al^{3+} exchangeable soil in their biometric characteristics and phytotechnical parameters. Rice cultivars IAPAR-177 and IAPAR-9 presented tolerance higher than 43% saturation for Al^{3+} in soil CTC. The Colombian cultivars are less tolerant to Al^{3+} than the Brazilian genotypes, except Fedearroz-68, which presented the highest tolerance to Al^{3+} , differing from the others. The tolerance index (IT) and the harvest index (CI) are adequate variables to distinguish between sensitive and aluminum soil tolerant rice cultivars.

Key words: Saturation for Al^{3+} . Tolerance index. Acid soils.

3.3 INTRODUÇÃO

Aproximadamente 3,95 milhões de hectares de terras agricultáveis do mundo, são afetadas pela acidez. Solos com essa característica ocorrem principalmente nas regiões tropicais e são considerados de aproveitamento marginal e de difícil adaptação à exploração agrícola (VON UEXKULL; MUTERT, 1995).

No ecossistema de savana neotropical da América do Sul há cerca de 265 milhões de hectares de solos ácidos (VERA, 2000), distribuídos em diferentes países como Brasil (78%), Venezuela (10%), Colômbia (6,5%), Bolívia (5,3%) e Guiana (1,5%) (YOUNG; SOLBRIG, 1993; MISTRY, 2000), que apresentam baixa capacidade de troca catiônica e baixos teores de matéria orgânica (BORKERT; SFREDO, 1995), fatores altamente limitantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (BIANCHI-HALL et al., 2000). Essas áreas são consideradas importantes fronteiras para expansão das atividades agropecuárias globais (BOURLAUG; DOSWELL, 1994).

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das fontes básicas da alimentação humana, mas com o aumento populacional global, a demanda por este cereal só poderá ser atendida pela intensificação no uso de tecnologias que permitam a sua produção em ambientes adversos como os solos ácidos, altamente intemperizados (JAN; PETERSON, 1993).

A avaliação dos cultivares de arroz para tolerância ao Al^{3+} pode ser realizada em solos ácidos ou em solução nutritiva (SANTOS, 1991; FERREIRA et al., 1995; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a), uma vez que, há razoável concordância de resultados entre esses métodos (HOWELER; CADAVID, 1976). Já foram caracterizados dois tipos de mecanismos que as plantas utilizam para sobreviver em solos ácidos: resistência ao Al^{3+} e (2) tolerância ao Al^{3+} intracelular (RAIJ et al., 2011).

Apesar dos sintomas de toxicidade ao Al^{3+} se apresentar primeiro no sistema radicular (FOY; DUNCAN; WASKOM, 1993), alguns autores utilizam variáveis relativas à parte aérea para discriminar cultivares de arroz tolerante ao Al^{3+} (FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; JAN; PETERSON, 1989). Em algumas plantas os sintomas de toxidez do Al^{3+} se assemelham àqueles ligados à deficiência de P, ao passo que, em outras, assemelham-se a uma deficiência de Ca^{2+} (FOY, 1983).

A calagem é a técnica mais eficiente para eliminar os problemas causados pela toxicidade de Al^{3+} , Fe^{+3} e Mn^{2+} das áreas de solos ácidos. É uma prática agrícola que além de corrigir a toxidez de Al^{3+} , acrescenta principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , e aumenta a saturação por bases dos solos (CAIRES et al., 2004; FAGERIA; MOREIRA; COELHO, 2011). Com a correção da acidez do solo aumenta-se também a CTC (capacidade de troca catiônica) e a disponibilidade de nutrientes como nitrogênio, fósforo, enxofre e molibdênio e por último aumenta a mineralização da matéria orgânica do solo (OLIVEIRA et al., 2002; FAGERIA; BALIGAR, 2008).

Mesmo sendo considerada como espécie relativamente tolerante ao Al^{3+} e adaptada às condições de acidez do solo (KIKUI et al., 2005; FORNASIERI FILHO; FORNACIERI, 2006; SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010), para o cultivo do arroz de sequeiro ou de terras altas em áreas de solos ácidos recomenda-se a aplicação de calcário para elevar a saturação por bases a 50% (CANTARELLA; FURLANI, 1997), destacando que há diferença de comportamento entre os cultivares de arroz quanto à resposta a prática da calagem devido à tolerância diferencial ao Al^{3+} , como indicado por Matsumoto (2000)

De acordo com Matsuo e Mochizuki, (2009), o arroz de sequeiro ou de terras altas apresenta sistema radicular profundo e alta relação raiz/parte aérea, conferindo resistência à seca e maior rusticidade às plantas, porém o potencial produtivo desses materiais é baixo. Sendo assim, plantas com sistemas radiculares capaz de explorar o perfil do solo em profundidade são fundamentais para garantir em maior absorção de água e nutrientes e a expressão máxima do potencial produtivo dos cultivares (ROY; MANDAL, 2005).

A seleção de cultivares tolerantes à toxidez de Al^{3+} é uma das mais importantes técnicas que possibilita incorporar ao processo produtivo grandes áreas com predominância de solos ácidos (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988), entretanto, a seleção de plantas tolerantes não pode ser considerada como o único recurso para mitigar a toxicidade de Al^{3+} , pois, caso os processos que contribuem para acidificação do solo persistam, haverá um momento em que mesmo as plantas tolerantes ao Al^{3+} não produzirão adequadamente (WRIGTH, 1989).

A busca por cultivares tolerantes ao Al^{3+} vem despertando o interesse de muitas áreas da pesquisa, particularmente quando se pretende explorar eficientemente solos ácidos que contenham Al^{3+} nas camadas subsuperficiais de difícil correção com manejo químico via calagem. Para Freitas et al. (2006) em solos

com altos teores de alumínio cultivados em períodos de deficiência hídrica, podem ocorrer reduções drásticas da produtividade das culturas, e inviabilizar o aproveitamento das áreas de solos ácidos (FREITAS et al., 2006).

Para Faquin (1994), o principal efeito da acidez dos solos é a toxidez do Al^{3+} , sendo a saturação por Al^{3+} (m%), o índice que melhor afere essa característica dos solos ácidos (SOUSA et al., 1980) e, segundo Foy (1992), o melhor critério de avaliação do grau de toxidez desse elemento para as plantas.

A solução satisfatória para incorporação de áreas de solos ácidos ao processo produtivo da cultura do arroz deve associar a busca por genótipos com algum grau de tolerância ao Al^{3+} , com aplicações de mínimas de calcário (JAN, 1993), visando apenas aumentar os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} do solo e, ao mesmo tempo, reduzir os custos de produção (CARVER; OWNBY, 1995).

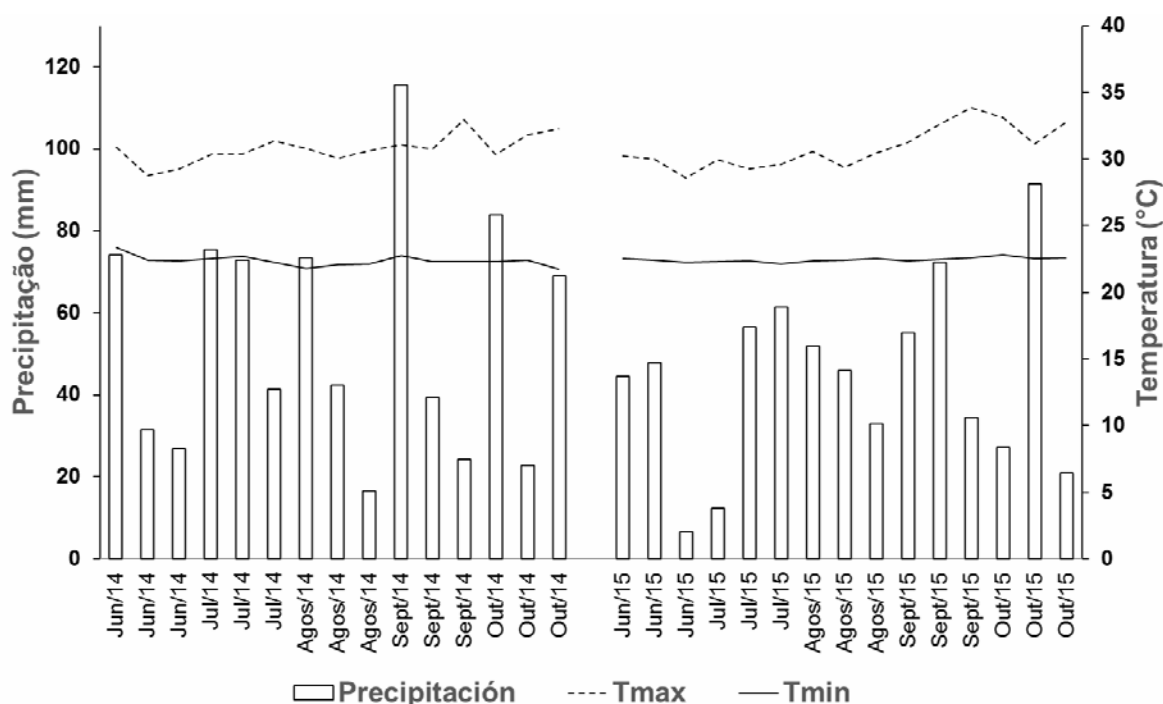
Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento de cultivares de arroz de sequeiro, desenvolvidos na Colômbia e Brasil, em solo com diferentes saturações por alumínio.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em ambiente de campo, no município de San Luís de Palenque, Casanare, Colômbia, situada nas coordenadas 5°15' latitude Norte e 71°55' de longitude Oeste, 240 metros de altitude, no primeiro semestre dos anos 2014 e 2015. O clima característico da região é bosque úmido tropical (bh-T), segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 2350 mm, e a temperatura média anual é de 23,5°C com umidade relativa do ar média anual variando entre 70 e 80%. Os dados meteorológicos do período de condução dos experimentos foram obtidos junto a estação meteorológica da Federação Nacional de Arrozeiros -Fondo Nacional del Arroz (FEDEARROZ-FNA), situada a 7 km da área experimental, e estão apresentados na Figura 3.1.

O solo da área experimental, conforme levantamento detalhado realizado pelo Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014), que utiliza o sistema americano de classificação dos Solos (DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2010) como referência, foi classificado como Oxic Dystrudepts, que se caracteriza como solo de baixa fertilidade natural e alto teor de alumínio trocável.

Figura 3.1 - Variações médias das temperaturas máxima e mínima e distribuição das precipitações durante os períodos de execução dos experimentos por decêndio nas safras 2014 e 2015. San Luis de Palenque, Casanare, Colômbia.



Fonte: Elaboração do autor.

Em dezembro de 2013, foi realizada amostragem de solo, na profundidade de 0-20 cm, para realização de análise química, de acordo com a metodologia proposta pelo IGAC (2006). Antes da instalação dos experimentos de campo foi realizado um experimento prévio de incubação com sais puros de CaCO_3 e MgCO_3 , para definição das doses de calcário a aplicar para criar ao final do processo diferentes níveis de saturação por Al^{3+} . A terra coletada foi tamisada utilizando peneira de malha 4,0 mm que foram transferidas para vasos com capacidade para 3,5 quilos de terra, revestidos com bolsas plásticas. Para incubação foi utilizada uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 , na relação Ca:Mg = 4:1 em diferentes quantidades visando obter valores diferentes de saturação por Al^{3+} . Após a aplicação do calcário, os vasos foram umedecidos a 70% da capacidade máxima de retenção de água (CRMA) do solo. Para impedir as perdas de água e facilitar as trocas gasosas, durante o período de incubação foi instalada uma pequena cânula na parte superior de cada bolsa plástica. Durante esta fase os solos não foram irrigados.

Após o período de incubação a terra de cada vaso foi novamente amostrada e analisada para obter a curva de neutralização do Al^{3+} . Com base na

curva de regressão obtida foram definidas as doses de calcário a aplicar para criar valores próximos de 0; 20; 40; 60 e 80% de saturação por Al^{3+} .

Na primeira quinzena do mês de junho de 2014 e em maio de 2015 foram coletadas amostras compostas de terra da camada superficial de 0-20 cm para caracterização da fertilidade e amostras indeformadas (0-10 e 10-20 cm) para avaliação da granulométrica do solo da área de instalação dos experimentos. Os resultados destas análises estão apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

O solo da área de instalação dos experimentos foi preparado ao apresentar condições adequadas de umidade, procedendo-se duas gradagens na profundidade de 20 cm e a utilização da plaina niveladora para o micro nivelamento. O calcário, nas doses definidas para cada parcela experimental, foi distribuído a lança e incorporado com grade na camada superficial de 0 - 20 cm de profundidade no dia 11/02/2014. O calcário utilizado apresentava as seguintes características: 84% de PRNT; 35,6% de CaO e 10,5% de MgO.

Tabela 3.1 – Resultados médios das análises químicas do solo, na profundidade de 0-20 cm das parcelas experimentais após a calagem, antes das instalações dos experimentos de campo dos anos, 2014 e 2015.

Sat. Al (m=%)	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Ca -----	Mg -----	K cmol _c dm ⁻³	Al -----	T	V %	MO g.kg ⁻¹
0	5,27±0,3*	2,89±0,3	4,81±0,4	1,32±0,05	0,11±0,01	0,04±0,02	11,70±0,9	53,47±1,3	11,11±0,5
22	5,02±0,2	2,77±0,6	3,54±0,5	0,97±0,11	0,13±0,03	1,29±0,09	11,72±0,8	39,64±2,1	11,24±0,4
41	4,73±0,3	2,84±0,5	2,31±0,4	0,64±0,15	0,10±0,02	2,12±0,12	12,58±1,3	24,22±1,9	11,17±0,5
62	4,53±0,2	2,73±0,4	1,57±0,6	0,43±0,18	0,13±0,04	3,25±0,17	15,30±1,1	13,94±1,7	11,12±0,6
83	4,31±0,1	2,82±0,3	0,65±0,1	0,18±0,07	0,12±0,02	4,90±0,14	16,15±0,4	5,81±0,6	11,07±0,4

*± desvio padrão

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 3.2 - Características granulométricas do solo antes da instalação dos experimentos de campo dos anos 2014 e 2015.

Profundidade (cm)	Areia -----	Argila -----	Silte -----	Classificação textural do Solo
	g kg ⁻¹			
0 - 10	490	240	270	Media
10 - 20	450	280	260	Media

*Cada amostra foi composta de 4 amostras simples

Fonte: Elaboração do autor.

A semeadura da cultura de arroz foi realizada no dia 01/06/2014, após 124 dias da calagem. Utilizou-se semeadora tratorizada regulada para o espaçamento de 0,17 m entre linhas. A densidade de semeadura foi de 150 kg ha⁻¹, realizada manualmente, visando obter entre 80 a 85 plantas por metro linear de fileira.

O delineamento experimental usado foi inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos resultaram de um fatorial 8x5 em que os fatores foram oito genótipos de arroz (4 desenvolvidos no Brasil e 4 na Colômbia) e cinco valores de saturação por Al³⁺ (0, 21, 43, 62 e 83%). Os genótipos testados foram: i) origem brasileira: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao Al³⁺) e a CNA-8521 (sensível ao Al³⁺) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, e os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177; ii) quatro cultivares de origem colombiana: Fedearroz-68, Fedearroz-174, Fedearroz-67 e Fedearroz-2000.

A adubação de semeadura foi definida com base nos resultados das análises químicas do solo e correspondeu à aplicação de 150 kg ha⁻¹ da fórmula 10-30-10 (N-P-K). As adubações nitrogenadas de cobertura correspondente à dose de 120 kg ha⁻¹, foi parcelada em três aplicações aos 15, 30 e 45 dias após a emergência (DAE), utilizando como fonte de nitrogênio a uréia (46% de N). Em cada época de realização da adubação de cobertura a aplicação da uréia foi realizada de forma manual com distribuição superficial a lanço.

A emergência da cultura ocorreu em 08/07/2014, aos oito dias após a semeadura e durante o desenvolvimento da cultura a área experimental foi monitorada quanto à ocorrência de plantas daninhas, pragas e doenças. O controle de plantas daninhas foi realizado em pós-emergência (10 DAE), utilizando-se o

herbicida bispyribac sodium (60 g ha⁻¹ do i.a.) e metsulfuron-methyl (3,2 g ha⁻¹ do i.a.) visando o controle principalmente de gramíneas e plantas de folhas largas no início e no final do estágio de perfilhamento. As demais plantas daninhas não controladas pelos herbicidas foram eliminadas manualmente. Houve ainda a necessidade de controle da lagarta da folha (*Spodoptera frugiperda*) utilizando-se inseticida a base de cipermetrina na dosagem de 70 g ha⁻¹ do i.a.

Os tratamentos fitossanitários para controle de brusone realizados durante a condução do experimento consistiram em programa: uma aplicação de trifloxistrobina + propiconazol, (200+125 g ha⁻¹ do i.a); uma aplicação de difenoconazol (300 g ha⁻¹ do i.a.) e; uma aplicação de mancozeb (450 g ha⁻¹ do i.a).

A colheita foi realizada manualmente na área útil das parcelas experimentais, nas datas 04/10/2014 (Experimento I) e 15/10/2015 (Experimento II), quando os grãos apresentavam em média 25% de umidade.

Para avaliar o comportamento diferencial das cultivares de arroz em função da saturação por Al³⁺, foram feitas às seguintes avaliações: a) análises químicas do solo (pH, Carbono orgânico, P, K⁺, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al) para avaliação da fertilidade, b) variáveis biométricas: altura de planta (AP), produção total de massa seca de parte aérea (MSPA), número de colmos por m² (NC), número de panículas por m² (NP), porcentagem de colmos férteis (PCF), número de grãos cheios por panícula (NGC), número de espiguetas chochos por panícula (NECP), índice de colheita (IC), produtividade (kg ha⁻¹) de grãos, corrigida para 13% de umidade.

Com base nos dados anteriores foi possível calcular os valores do índice de tolerância a saturação por Al³⁺ do solo, adaptada da metodologia descrita por Ferreira (1986), Taylor (1988), Furlani e Furlani (1991) e Freitas et al. (2006) visando eliminar diferenças genotípicas com relação aos parâmetros avaliados, utilizando a seguinte equação:

$$IT = (PAR+ Al^{3+} / PAR- Al^{3+}) \times 100, \text{ onde:}$$

IT = índice de tolerância à saturação por Al³⁺ (%).

PAR+ Al³⁺: valor do parâmetro avaliado no tratamento com Al³⁺

PAR- Al³⁺: valor do parâmetro avaliado no tratamento sem Al³⁺

3.4.1 DESCRIÇÃO DE CULTIVARES

3.4.1.1 Fedearroz-68

O cultivar FEDEARROZ-68 foi selecionado e lançado em 2016 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Planta de porte baixo (85 - 105 cm), moderadamente resistente ao acamamento. O perfilhamento é intermediário, o ciclo é semiprecoce (98 - 108 dias), o período entre a emergência e o florescimento varia de 65 a 75 dias e os grãos são do tipo longo fino. Apresenta tolerância à brusone (*Pyricularia grisea*) e ao vírus de folha branca (RVHB), porém é susceptível a *Rhizoctonia solani*. Apresenta ainda estabilidade de produção e bom desenvolvimento mesmo em solos de baixa fertilidade. A densidade de semeadura recomendada é de 100 a 150 kg ha⁻¹ para plantio em sulcos e de 160 a 180 kg ha⁻¹ para distribuição a lanço.

3.4.1.2 Fedearroz-67

O cultivar FEDEARROZ-67 resultou do cruzamento entre os genótipos LV1063-7-3-MV-4 X FLO3174-8P-7-2P-2P-M, foi lançado em 2016 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Planta de porte médio (120-130 cm) e ciclo vegetativo médio (116-125 dias). Apresenta alto perfilhamento, porém é resistente ao acamamento. Período entre a emergência e o florescimento varia de 75 a 83 dias, e os grãos são do tipo longo fino (agulhinha). É moderadamente sucessível a brusone e susceptível a *Rhizoctonia solani*. Sensível ao déficit hídrico e exige bom manejo da água. Apresenta sensibilidade ao herbicida clomazone. A densidade recomendada é de 100 a 130 kg ha⁻¹ para semeadura em sulcos e de 150 a 160 kg ha⁻¹, para semeadura a lanço.

3.4.1.3 Fedearroz-174

O cultivar FEDEARROZ-174 proveniente do cruzamento entre os genótipos CT10992-3-4-1T-3P-2P-3/ICTA PAZOS X ICTA COLOMGUA, foi lançado em 2007 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Porte

intermediário (115 - 135 cm), ciclo intermediário (118 - 128 dias), alto perfilhamento efetivo (85 - 90%), e é resistente ao acamamento. Período entre a emergência e o florescimento varia de 78 a 85 dias. Os grãos são de tipo longo fino. Tolerante a brusone (*Pyricularia griseae*) e susceptível a bactéria *Burkholderia glumae*. É um cultivar considerado rústico, selecionado para tolerância ao déficit hídrico. Apresenta estabilidade de produção, e é adaptado ao cultivo em solos com baixos níveis de fertilidade. A densidade recomendada é de 100 a 130 kg ha⁻¹ para de semeadura em sulcos e de 150 a 180 kg ha⁻¹ para semeadura a lanço.

3.4.1.4 Fedearroz-2000

O cultivar FEDEARROZ-2000, resultado do cruzamento entre os genótipos P3084-F4-56-2-2/P3844-F3-19-1-1B-1x e CT8154-1-9-2, foi lançado em 2000, pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Apresenta porte médio (120-130 cm), ciclo é médio (116-118 dias), alto perfilhamento e tolerância ao acamamento. O período entre a emergência e o florescimento varia de 82-85 dias, apresentando alta estabilidade e adaptabilidade de produção e os grãos são de tipo longo fino (agulhinha). Susceptível a brusone (*Pyricularia griseae*), *Rhizoctonia solani* e à bactéria *Burkholderia glumae*, porém apresenta alta resistência ao vírus de folha branca (RVHB). Moderadamente exigente em fertilidade do solo. A densidade recomendada é 120 a 130 kg ha⁻¹ para semeadura em sulcos e de 150 a 170 kg ha⁻¹ para semeadura a lanço.

3.4.1.5 IAPAR-9

O cultivar IAPAR-9 foi selecionado e lançado em 1983 pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Brasil, resultado do cruzamento entre a linhagem IAC-F-3-7 e o cultivar BATATAIS 83. Apresenta porte alto (121 - 131 cm), ciclo médio (125 - 130 dias), perfilhamento intermediário e é moderadamente suscetível ao acamamento. O florescimento ocorre entre 88 a 93 dias a partir da emergência. Apresenta tolerância à brusone (*Pyricularia griseae*) e a toxicidade ao ferro. Apresenta estabilidade de produção e os grãos são do tipo longo fino. Desenvolve bem em solos de baixa fertilidade.

3.4.1.6 Linhagens CNA-4164 e CNA-8521

As linhagens são provenientes do banco ativo de germoplasma da EMBRAPA - Arroz e Feijão, Goiânia, GO, Brasil, e foram desenvolvidas através de um programa de retrocruzamentos, iniciado em 1995, entre cultivares comerciais e genótipos com alguma resistência à brusone. Em 1998 as linhagens foram submetidas a novas avaliações para resistência à brusone em canteiros, e para outras características agrônomicas como, ciclo, altura de planta, resistência ao acamamento, produtividade e qualidade de grãos, em ensaios conduzidos em Goiás. De acordo com Guimarães et al (2006) as linhagens CNA-4164 e CNA-8521 foram selecionadas como tolerante e sensível ao alumínio, respectivamente.

3.4.2 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise conjunta de experimentos. O agrupamento dos dados foi feito, considerando a ordem de grandeza dos quadrados médios residuais das análises dos experimentos individuais, de acordo com as recomendações de Banzatto e Kronka (1989), ou seja, para agrupar e realizar a análise conjunta de experimentos, os quadrados médios residuais não podem ultrapassar uma relação aproximada de 7:1. Satisfeitas essas condições foram realizadas as análises conjuntas dos dados originais dos dois experimentos realizados em 2014 e 2015. Os cultivares, foram comparados pelo teste de Scott-Knott ao 5% de probabilidade, enquanto os efeitos das saturações por Al^{3+} foram avaliados por meio de ajustes de regressões polinomiais, utilizando o programa estatístico R (R Development core team, 2013).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação anos agrícolas (A), cultivar (C) e saturação por Al^{3+} (m), não foi significativa. Entretanto, foram observados efeitos significativos para os efeitos principais de cultivares (C), saturação por Al^{3+} (m) e para a interação (C x m) para todas as variáveis avaliadas.

A altura das plantas de arroz foi influenciada pelos efeitos principais de cultivares e da saturação por Al^{3+} no solo (Tabela 3.3). O aumento na saturação

do solo por Al^{3+} , reduziu a altura das plantas de todos os cultivares avaliados, concordando com resultados apresentados por pesquisadores como Howeler e Cadavid (1976), Tanaka, Ponte e Morais (1983) e Silva et al. (2011), que também observaram que plantas de arroz submetidas a estresse por Al^{3+} apresentam menores alturas em comparação àquelas que se desenvolvem em condições adequadas de solos corrigidos.

As maiores alturas de plantas (129,5 cm) foram observadas para o cultivar brasileiro IAPAR-9, que diferiu dos cultivares de origem colombiana Fedearroz-2000, Fedearroz-67, Fedearroz-174 e Fedearroz-2000. O menor valor foi registrado para o cultivar colombiano Fedearroz-68 (Tabela 3.3). A altura das plantas é uma característica específica de cada cultivar, que depende diretamente de suas características genéticas, originando assim diferenças encontradas entre variedades, linhagens e cultivares. Como indicado por Breseghello et al. (1998), Pinheiro (1999) e Freitas et al (2012), os cultivares de arroz de uso tradicional no Brasil apresentam altura elevada, raízes profundas, baixo perfilhamento e bom desenvolvimento em solos de baixa fertilidade natural, inclusive naqueles com baixos a médios teores de Al^{3+} trocável.

Tabela 3.3 - Médias de altura de plantas (cm) e equação de regressão linear para cultivares/linhagem de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} no solo. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Altura das Plantas (cm)
IAPAR-9	129,49 A ⁽¹⁾
IAPAR-177	126,06 A
CNA 4164	120,90 B
CNA-8521	120,65 B
FEDEARROZ-174	120,00 B
FEDEARROZ-2000	119,36 B
FEDEARROZ-67	115,94 C
FEDEARROZ-68	109,66 D
C.V.(%)	7,97
Equação de regressão	
AP = 127,09 - 0,163 (m)	R ² = 0,991*

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. * = significativo a 1%; m= saturação por Al^{3+} (%) no solo.

Fonte: Elaboração do autor.

Avaliando o efeito direto da saturação por Al^{3+} na altura das plantas

verificou-se diminuição linear e significativa nesta variável para todas as cultivares de arroz, com uma taxa de decréscimo de 0,163 cm para cada 1% de aumento na saturação por alumínio (Tabela 3). Resultados semelhantes foram obtidos por Jan (2005), Garza et al. (2010) e Contreras (2013), que compararam as respostas de cultivares de arroz em diferentes concentrações de Al^{3+} em solução nutritiva e verificaram que os cultivares tolerantes alcançaram maior altura de plantas, melhor estruturação do sistema radicular e maior absorção de nutrientes que os cultivares sensíveis. Por outro lado, Macedo e Jan (2008) observaram nos cultivares de arroz sensíveis ao Al^{3+} o transporte de Ca^{2+} , P e Mn^{2+} das raízes até os pontos de crescimento é menor que nos cultivares tolerantes.

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA) para os diferentes cultivares de arroz foi influenciada significativamente pela saturação por Al^{3+} do solo (Tabela 3.4). Fedearroz-67 e Fedearroz-2000 foram os cultivares que apresentaram as maiores produções de MSPA tanto na ausência como na presença de Al^{3+} do solo, diferindo dos outros cultivares. Na maior saturação avaliada ($m=83\%$), a linhagem CNA-8521 registrou a menor produção de MSPA (1.957 kg ha^{-1}), sendo significativamente inferior aos demais cultivares avaliados (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Valores médios para produção de massa seca da parte aérea (MSPA) (kg ha^{-1}) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
FEDEARROZ-67	6.875 A*	7.387 A	7.285 A	6.377 A	5.417 A
FEDEARROZ-2000	6.365 A	7.008 A	7.016 A	6.690 A	4.990 A
FEDEARROZ-174	5.187 B	5.801 B	5.955 B	5.356 B	4.576 B
IAPAR-9	4.525 B	4.855 B	5.000 B	5.198 B	4.332 B
IAPAR-177	4.538 B	4.959 B	5.203 B	4.994 B	4.306 B
CNA-4164	4.794 B	5.370 B	5.523 B	4.746 B	4.074 B
FEDEARROZ-68	4.521 B	5.136 B	5.186 B	4.955 B	4.057 B
CNA-8521	4.819 B	5.527 B	5.225 B	4.114 B	1.957 C
CV (%)	11,38				

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Independentemente do ano de cultivo a produção de MSPA dos cultivares avaliados diminuiu com o aumento da saturação por Al^{3+} (Tabela 3.5). Os cultivares IAPAR-177 e IAPAR-9 devem ser destacados, uma vez que superaram os demais cultivares avaliados, apresentando uma produção de MSPA crescente até valores de saturação por Al^{3+} de 43% e 42%, respectivamente (Tabela 3.5). Entre os cultivares colombianos, o FEDEARROZ-68 foi o que apresentou melhor desempenho, aumentando a produção MSPA até a saturação por Al^{3+} de 40,1%, comportamento semelhante aos cultivares brasileiros IAPAR-177 e IAPAR-9. Os demais cultivares colombianos se comportaram como a linhagem CNA-8521, considerada sensível ao alumínio do solo. Os resultados obtidos corroboram com aqueles apresentados por Contreras (2013), que trabalhou com diferentes cultivares de arroz (brasileiros e colombianos) em solução nutritiva e verificaram comportamentos variáveis entre os materiais avaliados quanto à tolerância ou sensibilidade ao alumínio.

Tabela 3.5 - Equações de regressão polinomial para produção ($kg\ ha^{-1}$) de massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão	R ²	Ponto de máximo
IAPAR-9	$MSPA = 4.457 + 0,0319m^{(1)} - 0,00038m^2$	0,79**	42,0
IAPAR-177	$MSPA = 5.504 + 0,0346m - 0,00040m^2$	0,98**	43,0
CNA-4164	$MSPA = 4.875 + 0,0370m - 0,00054m^2$	0,94*	35,5
FEDEARROZ-68	$MSPA = 4.520 + 0,0402m - 0,00051m^2$	0,99*	40,1
FEDEARROZ-174	$MSPA = 5.201 + 0,0408m - 0,00058m^2$	0,92*	35,2
FEDEARROZ-2000	$MSPA = 6.310 + 0,0547m - 0,00083m^2$	0,97*	32,0
FEDEARROZ-67	$MSPA = 6.915 + 0,0332m - 0,00062m^2$	0,97*	27,1
CNA-8521	$MSPA = 4.819 + 0,0567m - 0,00110m^2$	0,99*	26,0

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

De maneira geral, os cultivares de arroz avaliados apresentaram ganhos na produção de MSPA (Tabela 3.4), indicando certo estímulo ao crescimento da planta determinado pelo Al^{3+} do solo. Isto evidencia que os cultivares toleram certa quantidade de Al^{3+} no solo, necessitando apenas de uma calagem parcial para expressar seu potencial produtivo. Esses resultados corroboram com aqueles apresentados por Pavinato et al. (2009), Soratto, Crusciol e Mello (2010) e Crusciol

et al. (2012), que verificaram que as maiores produções de MSPA de plantas de arroz foram obtidas com doses intermediárias de calcário, não havendo necessidade de neutralizar todo o Al^{3+} trocável do solo. Esses autores indicam que a seleção de variedades ou cultivares de arroz para cultivo em áreas de solos ácidos e com a presença de Al^{3+} é de fundamental importância, principalmente quando se adota o sistema de semeadura direta em áreas de sequeiro.

Os resultados desse estudo concordam com Duarte, Voltan e Furlani (1999), Prado (2003), Silva e Lemos (2008), e Martins (2005), ao verificaram que a cultura de arroz é responsiva à calagem do solo. Esses autores atribuíram esse efeito ao aumento do suprimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} , bem como a neutralização do Al^{3+} trocável.

Independentemente da safra considerada, o número de colmos/área (m^2) dos diferentes cultivares de arroz, foram influenciados pela saturação por Al^{3+} do solo (Tabela 3.6). Na ausência de Al^{3+} , ($m=0\%$) a linhagem CNA-8521 apresentou o maior valor com 507 colmos/ m^2 , diferindo dos demais cultivares de arroz avaliados. Esse resultado está de acordo com Fageria (1984), que afirma que os nutrientes necessários para um ativo perfilhamento são N, P e S, cuja disponibilidade é aumentada com a neutralização do alumínio trocável do solo, via calagem.

Tabela 3.6 - Valores médios de número de colmos/ m^2 (NC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
CNA-4164	269,3 C	393,9 C	439,1 A	365,5 B	140,1 B
CNA-8521	507,6 A*	582,3 A	341,7 B	296,3 B	184,6 B
IAPAR-9	201,6 C	402,5 C	382,9 B	315,9 B	195,7 B
FEDEARROZ-67	404,2 B	477,1 B	418,4 A	324,5 B	218,5 A
FEDEARROZ-68	249,9 C	246,6 E	380,4 B	348,0 B	237,3 A
FEDEARROZ-174	376,1 B	408,6 C	457,9 A	434,9 A	236,6 A
FEDEARROZ-2000	337,5 B	408,3 C	440,0 A	351,5 B	248,4 A
IAPAR-177	215,0 C	326,0 D	480,0 A	382,9 A	266,0 A

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Na máxima saturação por Al^{3+} testada ($m=83\%$) foi possível observar que os cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-2000, FEDEARROZ-174, FEDEARROZ-68 e FEDEARROZ-67 apresentaram os maiores valores, mas não diferiram entre si (Tabela 3.6). Esses resultados estão relacionados às características genéticas dos cultivares como indicam Breseghello et al. (1998) e Cargnin et al. (2010), pois segundo estes autores os cultivares de arroz do grupo considerado moderno, como o IAPAR-177, foram melhorados geneticamente visando selecionar materiais com maior capacidade de perfilhamento e de alta produtividade.

Ressalta-se também a forte relação entre o número de colmos/ m^2 e a produção de MSPA uma vez que, para os maiores valores obtidos para número de colmos/ m^2 , obteve-se também as maiores produções de MSPA (Tabela 3.4), corroborando assim com Silva e Lemos (2008) que também observaram essa correlação.

Por outro lado, considerando isoladamente os efeitos da saturação por Al^{3+} no solo, observa-se que as variações do número de colmos/ m^2 se ajustaram a um modelo quadrático, com pontos de máximos diferentes para cada cultivar avaliado (Tabela 3.7). Os cultivares IAPAR-177 e Fedearroz-68 apresentaram os melhores desempenhos, uma vez que o número de colmos/ m^2 foi crescente até valores de saturação por Al^{3+} de 45,35% e 45,08%, respectivamente, contrastando com o que foi observado para a linhagem CNA-8521 e o cultivar Fedearroz-67 que apresentaram os menores valores de ponto de máximo (29,07% e 22,5%, respectivamente), indicando menor tolerância ao Al^{3+} do solo (Tabela 3.7).

O número de colmos/ m^2 depende das características genéticas do cultivar (BRESEGHELLO et al., 1998), é definido no período que vai da germinação até dez dias após a diferenciação dos primórdios das panículas (SANTOS et al., 2006), está relacionado com o número de perfilhos, entretanto não é considerado um componente da produção, uma vez que nem todo perfilho se diferencia em panícula, órgão onde ocorre a formação dos grãos na planta de arroz.

A produção de número de panículas m^{-2} (Tabela 3.8) foi influenciada tanto pelo efeito de cultivares como pela saturação por Al^{3+} . Na ausência de Al^{3+} ($m=0\%$), os cultivares FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-174, CNA-8521 e FEDEARROZ-2000 foram os que apresentaram os maiores números de panículas m^{-2} , indicando o potencial de aproveitamento destes materiais em áreas de solo

corrigido. Verifica-se também que esses materiais mantêm e até aumentam o número de panículas/m² nas parcelas com saturação por Al³⁺ de até 21%. Aumentado a saturação por Al³⁺, altera-se o comportamento dos cultivares, quando se destaca os cultivares IAPAR-177 e FEDEARROZ-174, que aumentam a produção de panículas/área até a saturação por Al³⁺ de 43% (Tabela 3.8).

Tabela 3.7 - Equações de regressão polinomial para o número de colmos/m² (NC) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al³⁺. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão	R ²	Ponto de Máximo
IAPAR-177	NC= 200,17+10,4m ⁽¹⁾ - 0,116m ²	0,89*	45,35
IAPAR-9	NC= 220,71+9,02m- 0,114m ²	0,91*	39,51
FEDEARROZ-68	NC= 222,56+5,59m- 0,062m ²	0,61*	45,08
CNA-4164	NC= 261,80+9,91m- 0,136m ²	0,99*	36,41
FEDEARROZ-174	NC= 357,16+6,15m- 0,088m ²	0,88*	34,98
FEDEARROZ-2000	NC= 337,07+5,33m- 0,077m ²	0,96*	34,61
FEDEARROZ-67	NC= 416,95+2,97m- 0,066m ²	0,96*	22,53
CNA-8521	NC= 543,72+1,86m- 0,032m ²	0,86**	29,07

⁽¹⁾ m= saturação por Al³⁺. * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração dos autores.

Tabela 3.8 - Valores médios para número de panículas/m² (NP) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al³⁺. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al ³⁺ (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-177	184,18 B*	274,00 B	393,99 A	318,60 A	210,00 A
FEDEARROZ-68	217,00 B	228,99 B	324,00 B	285,36 A	186,50 A
FEDEARROZ-174	319,70 A	361,09 A	378,11 A	341,60 A	177,50 A
FEDEARROZ-2000	277,00 A	316,79 A	334,82 B	265,00 B	156,12 A
IAPAR-9	178,80 B	344,99 A	315,00 B	262,36 B	152,07 A
FEDEARROZ-67	322,02 A	368,19 A	317,08 B	241,99 B	128,99 B
CNA-4164	198,31 B	314,99 A	325,80 B	232,37 B	92,81 B
CNA-8521	312,00 A	331,44 A	296,58 B	203,27 B	82,13 B

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Com o aumento da saturação por Al^{3+} para valores superiores a 43%, todos os cultivares apresentaram reduções progressivas no número de panículas/m². Os menores valores foram registrados para CNA-8521, CNA-4164 e FEDEARROZ-67 (Tabela 3.8). Concordando com os resultados apresentados por Vasconcelos, Rossiello e Jacobe Neto (2002) e Freitas, Fernandes e Maia (2015), em seus trabalhos com cultivo de arroz em solo com saturação por Al^{3+} superiores a 50%. Esses resultados corroboram também com aqueles apresentados por Breseghello, Castro e Morais (1998), Guimarães et al. (2006), Contreras (2013), que classificaram a linhagem CNA-8521 como sensível à presença de Al^{3+} no substrato de crescimento das plantas de arroz.

Considerando de forma isolada o efeito do Al^{3+} no solo, foi possível observar que o modelo mais adequado para explicar as variações do número de panículas m⁻² em função da saturação do solo por Al^{3+} foi a função quadrática ou regressão polinomial de segundo grau, independente do cultivar considerado (Tabela 3.9). Isso permitiu estimar que os números máximos de panículas m⁻² foram obtidos com 43,94% e 17,00% de saturação por Al^{3+} para o cultivar IAPAR-177 e para a linhagem CNA-8521, respectivamente, indicando mais uma vez a existência de grande variabilidade genética entre os materiais avaliados neste estudo.

Merecem destaque os cultivares colombianos FEDEARROZ -68, FEDEARROZ -174 e FEDEARROZ -2000 que apresentaram pontos de máximos para a saturações por Al^{3+} de 41,44; 32,06; 30,43% respectivamente, podendo ser considerados como de tolerância intermediária a alta para a presença de Al^{3+} no solo.

Essas avaliações estão de acordo com as observações de diversos pesquisadores (FURLANI; HANNA, 1984; FAGERIA; WRIGTH; BALIGAR, 1988; RYAN; DITOMASO; KOCHIAN, 1993; PARKER, 1995; FERREIRA et al., 1995; MACEDO; KINET; VAN SINT, 1997; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b) que indicaram que a sensibilidade das plantas de arroz à toxidez causada pelo Al^{3+} , estava diretamente associada às características genéticas dos cultivares avaliados.

As linhagens CNA-4164 e CNA-8521 apresentaram pontos máximos para saturação por Al^{3+} de m= 34,61 e 17%, respectivamente. Esses resultados corroboram com aqueles apresentados por Guimarães et al. (2006) que as classificaram como tolerante e sensível ao Al^{3+} , respectivamente.

Tabela 3.9 - Equações de regressão polinomial para número de panículas/m² (NP) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al³⁺. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão	R ²	Pontos de Máximo
IAPAR-177	NP=172,01 + 8,560m ⁽¹⁾ - 0,0974m ²	0,90*	43,94
IAPAR-9	NP=195,53 + 7,285m - 0,0950m ²	0,91*	38,32
FEDEARROZ-68	NP=198,11 + 4,841m - 0,0584m ²	0,65*	41,44
CNA-4164	NP=203,17 + 7,109m - 0,1027m ²	0,98*	34,61
FEDEARROZ-174	NP=309,98 + 4,969m - 0,0775m ²	0,95*	32,06
FEDEARROZ-2000	NP=273,39 + 3,921m - 0,0644m ²	0,98*	30,43
FEDEARROZ-67	NP=320,04 + 2,332m - 0,0578m ²	0,98*	20,16
CNA-8521	NP=313,90 + 1,942m - 0,0576m ²	0,99*	17,00

⁽¹⁾ m= saturação por Al³⁺. * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

A relação porcentual entre número de panículas/m² e o número de colmos/m², indica a percentagem de colmos férteis (PCF) e é considerado como indicador da eficiência de determinado cultivar de arroz. Sendo assim, quanto maior for esse valor, maior será a eficiência do cultivar considerado. Nesse aspecto destacam-se os cultivares IAPAR-9, IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e FEDEARROZ-174 (Tabela 3.10), que apresentaram eficiência acima de 74,55% mesmo em solos com 83% de saturação por Al³⁺. Entretanto, entre estes cultivares chama a atenção o FEDEARROZ-174 que foi considerado sensível ao Al³⁺ do solo por apresentar baixa produção de MSPA (Tabela 3.4). Por outro lado, este cultivar apresentou grande número de colmos/m², devido a sua característica de grande perfilhamento, garantindo assim a sua alta eficiência na produção de colmos férteis. Os cultivares IAPAR-9, IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e FEDEARROZ-174, mantiveram comportamento semelhantes entre eles, para todos os níveis de Al³⁺ do solo.

O cultivar FEDEARROZ-67 e a linhagem CNA-8521, produziram os maiores número de colmos/m² em ausência de Al³⁺ (Tabela 3.6), devido a seu alto perfilhamento, entretanto apresentaram os menores percentuais de colmos férteis na maior saturação por Al³⁺ do solo (Tabela 3.10). Embora tenha sido melhorado geneticamente e selecionado para alto potencial produtivo, apresentou menor percentagem de colmos férteis em razão de sua maior exigência nutricional. Para aumentar a eficiência deste material seria necessário a aplicação de maior quantidade de nutrientes, via adubação.

Tabela 3.10 - Valores médios para porcentagem de colmos férteis/m² (PCF) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al³⁺. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al ³⁺ (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-9	88,76 A	85,75 A	82,14 A	83,12 A	81,15 A
IAPAR-177	86,36 A*	84,44 A	82,28 A	83,02 A	78,46 A
FEDEARROZ-68	86,35 A	87,87 A	85,23 A	82,10 A	78,44 A
FEDEARROZ-174	85,52 A	88,52 A	82,57 A	78,22 A	74,55 A
CNA-4164	73,64 B	79,64 B	74,04 B	63,46 B	66,55 B
FEDEARROZ-2000	82,37 A	77,56 B	76,13 B	75,45 A	65,67 B
FEDEARROZ-67	79,87 A	77,22 B	75,75 B	73,65 A	59,80 C
CNA-8521	67,42 B	63,24 C	61,78 C	55,44 B	44,18 D
CV (%)	8,55				

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Essa diminuição na porcentagem de colmos férteis com o aumento das saturações por Al³⁺ deve estar relacionada com a toxidez causada pelo alumínio como: diminuição da disponibilidade de nutrientes (N, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e S) e conseqüentemente, redução da produtividade das culturas (FAGERIA; BALIGAR; WRIGHT, 1989; FAGERIA; STONE, 1999; NICOLODI; ANGHINONI; GIANELLO, 2008, FREITAS et al., 2006).

O porcentagem de colmos férteis decresceu linearmente para todos os cultivares de arroz com o aumento das saturações por Al³⁺ no solo (Tabelas 3.10 e 3.11). O cultivar IAPAR-177 foi o que apresentou a menor taxa de perda da porcentagem de colmos férteis (0,0837) para cada aumento de 1% na saturação por alumínio, diferindo significativamente e ficando muito distante da linhagem CNA-8521 (sensível al Al³⁺) que registrou uma taxa cerca de 300% maior, ou seja 0,256 (Tabela 3.11). A diferença entre estes valores é um indicativo de maior tolerância ao Al³⁺ do solo, a favor dos cultivares que apresentam os valores mais baixos para esta característica. Entre os cultivares colombianos o FEDEARROZ-68 foi o que apresentou a menor taxa de perda que foi de 0,103, comportamento muito próximo aos dos cultivares IAPAR-177 e IAPAR-9, que foram os mais tolerantes. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por Fageria (2000), que obteve correlações negativas, entre os componentes de produção e o Al trocável do

solo em cultivares de arroz, sendo que as reduções mais intensas ocorreram sempre nos cultivares mais sensíveis.

Tabela 3.11 - Funções de regressão linear para porcentagem de colmos férteis (PCF) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão	R ²
IAPAR-177	PCF= 86,40 - 0,0837m ⁽¹⁾	0,86**
IAPAR-9	PCF= 87,81 - 0,0869m	0,85**
FEDEARROZ-68	PCF= 88,34 - 0,103m	0,81*
CNA-4164	PCF= 77,53 - 0,145m	0,54**
FEDEARROZ-174	PCF= 88,36 - 0,155m	0,82**
FEDEARROZ-2000	PCF= 82,60 - 0,171m	0,84**
FEDEARROZ-67	PCF= 82,05 - 0,210m	0,76**
CNA-8521	PCF= 69,15 - 0,256m	0,88*

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

O número de grãos cheios/panícula para os diferentes cultivares de arroz foi influenciado significativamente pela interação entre os cultivares e a saturação por Al^{3+} do solo (Tabelas 3.12 e 3.13). Os cultivares FEDEARROZ-2000, IAPAR-177 e FEDEARROZ-67, foram os que apresentaram os maiores números de grãos cheios na ausência de Al^{3+} no solo, diferindo dos demais cultivares avaliados (Tabelas 3.12).

Na maior saturação (m=83%), os cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-174 e IAPAR-9, continuaram apresentando os maiores números de grãos/panícula, porém com reduções de 33,3; 28,6 ; 41,81 e 37,5 %, respectivamente, em relação ao tratamento sem Al^{3+} (m=0%) (Tabela 3.12). Esses cultivares registraram um decréscimo no número de grãos cheios por panícula e está relacionado com às baixas características da fertilidade do solo, sobretudo devido ao pH e V% baixos (Tabela 3.1), pelo fato dos cultivares serem mais exigentes nutricionalmente para expressar seu maior potencial produtivo.

Com o incremento dos níveis da saturação por Al^{3+} até 43%, observaram-se aumentos no número de grãos por panícula para os cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-2000 (Tabela 3.12). O aumento de grãos cheios por panícula é uma característica genética,

indicando certo estímulo pelo Al^{3+} do solo. Esses resultados estão de acordo com Foy (1983b) e Paliwal e Sivaguru (1994), que já identificaram que pequenas quantidades de Al^{3+} podem favorecer o crescimento de algumas plantas.

Tabela 3.12 - Valores médios para número de grãos cheios/panícula (NGC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-177	122,2 A*	116,5 A	119,2 A	101,8 B	81,5 A
FEDEARROZ-68	109,1 B	126,4 A	134,8 A	126,4 A	77,9 A
FEDEARROZ-174	128,7 A	146,4 A	150,0 A	143,0 A	74,9 A
IAPAR-9	110,7 B	104,9 B	101,4 B	90,9 B	69,2 A
FEDEARROZ-2000	136,0 A	125,3 A	128,3 A	117,8 A	59,6 B
CNA-4164	95,0 B	88,6 B	89,6 B	78,7 B	55,3 B
FEDEARROZ-67	135,9 A	129,7 A	120,9 A	101,5 B	54,5 B
CNA-8521	109,8 B	99,4 B	83,3 B	66,5 C	43,1 C

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Avaliando os efeitos das saturações por Al^{3+} no solo em separado, foi possível observar que o número de grãos cheios/panícula se ajustou a modelos quadráticos para os cultivares colombianos FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-2000 (Tabela 3.13), permitindo estimar os pontos de máxima tolerância à saturação por Al^{3+} no solo com valores de 36,44; 33,05 e 20,31%, respectivamente.

Entretanto, para os cultivares e linhagens brasileiras, CNA-4164, IAPAR-177, IAPAR-9, CNA-8521 e o cultivar colombiano FEDEARROZ-67, o ajuste mais adequado foi para modelos lineares decrescentes, com reduções do número grãos cheios/panícula de 0,42; 0,46; 0,46; 0,80 e 0,91 respectivamente, para cada incremento de 1% na saturação por Al^{3+} do solo (Tabela 3.13). Essas reduções foram superiores no FEDEARROZ-67, indicando maior sensibilidade do que para a linhagem CNA-8521, utilizada como referência para genótipo de arroz sensível ao Al^{3+} do solo.

Tabela 3.13 - Funções de regressão linear e polinomial para o número de grãos cheios/ panícula (NGC) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão ⁽¹⁾	R ²
IAPAR-177	NGC = 127,55 - 0,461m	79,80**
IAPAR-9	NGC = 114,92 - 0,465m	87,45**
FEDEARROZ-68	NGC = 106,2 + 1,748m - 0,024m ²	95,26*
CNA-4164	NGC = 99,38 - 0,428m	79,33*
FEDEARROZ-174	NGC = 124,88 + 1,983m - 0,030m ²	93,62*
FEDEARROZ-2000	NGC = 130,08+0,731m- 0,018m ²	90,79*
FEDEARROZ-67	NGC = 146,92-0,918m	83,70*
CNA-8521	NGC = 113,96-0,801m	97,84*

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

O número de espiguetas chochas por panícula (NECP), foi influenciado apenas pelos efeitos principais de cultivar (C) e saturação por Al^{3+} (m) (Tabela 3.14). Assim, com incrementos na saturação por Al^{3+} no solo, foram registrados aumentos do NECP para todos os cultivares de arroz avaliados (Tabela 3.14) e diminuição no número de grãos cheios/panícula (NGC) (Tabela 3.12), concordando com resultados apresentados por outros pesquisadores como Ferreira Salgado e Jorge (1986) e Silva et al. (2011).

O maior valor de NECP foi observado na linhagem CNA-8521 (sensível) com valores de 39,6 que diferiu dos demais cultivares avaliados; enquanto o menor foi registrado para a linhagem CNA-4164 (Tolerante) (Tabela 3.14).

Avaliando a relação direta da saturação do solo por Al^{3+} no NECP, verificaram-se aumentos lineares e significativos para todos os cultivares de arroz, com uma taxa de crescimento de 0,135 espiguetas chochas por cada 1% de aumento na saturação por Al^{3+} do solo (Tabela 3.14).

Uma possibilidade para explicar a diferença entre os cultivares quanto ao NECP pode ser o alto perfilhamento da linhagem CNA-8521 (Tabela 3.6). Isso reforça a hipótese de que esses cultivares são mais exigente em fertilidade do solo, mas como discutido anteriormente, as condições do solo do experimento influenciaram negativamente o número de grãos cheios, aumentando como consequência o número de espiguetas chochas desta linhagem.

Tabela 3.14 - Valores médios e equação de regressão linear para o número de espiguetas chochos/panícula (NECP) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	NECP
CNA-8521	39,60 A ⁽¹⁾
FEDEARROZ-67	32,44 B
FEDEARROZ-2000	32,16 B
FEDEARROZ-174	31,20 B
IAPAR-177	25,19 C
FEDEARROZ-68	23,37 D
IAPAR-9	22,30 D
CNA-4164	18,57 D
C.V.(%)	26,42
Equação de regressão	R ²
NECP = 22,46+0,135m	0,80*

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao 5% de probabilidade. * = significativo a 1%. m= saturação por Al^{3+} (%) no solo.

Fonte: Elaboração do autor.

O cultivar IAPAR-9, considerado “rústico e tradicional” e tolerante ao Al^{3+} assim como os cultivares IAPAR-177 e FEDEARROZ-68, foram os que apresentaram os melhores desempenhos quando cultivados em solos com baixa fertilidade na máxima saturação por Al^{3+} . Isso se explica pelo fato destes cultivares conseguiram se nutrir e bioquimicamente transferir fotoassimilados para um maior número de grãos/panículas formadas, mesmo em condições inadequadas de fertilidade do solo.

Avaliando a produtividade de grãos dos cultivares de arroz, verifica-se que a mesma foi influenciada significativamente ($p \leq 0,05$), pelo efeito interativo entre a saturação por alumínio (S) e cultivares (C). Na ausência do Al^{3+} ($m=0\%$), os maiores produtividades foram obtidas com os cultivares colombianos FEDEARROZ-2000, FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-68, que produziram 4920; 4860; 4801 e 4135 kg ha⁻¹ respectivamente (Tabela 3.15). Os cultivares e linhagens brasileiras apresentaram produtividades de grãos de 3072; 2914; 2800 e 2489 kg ha⁻¹, respectivamente, IAPAR-177, CNA-8521, IAPAR-9 e CNA-4164.

Entretanto na maior saturação por Al^{3+} no solo ($m=83\%$), a situação se inverte e o cultivar IAPAR-177 foi o que apresentou a maior produtividade de grãos com valor de 3286 kg ha⁻¹ (Tabela 3.15). Nessa situação, a menor

produtividade (1123 kg ha^{-1}) foi apresentada pela linhagem CNA-8521 (sensível ao Al^{3+}).

Tabela 3.15 - Valores médios de produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-177	3.072 C*	4.157 B	4.637 A	4.638 B	3.286 A
FEDEARROZ-68	4.135 B	4.548 B	4.782 A	4.567 B	2.957 A
IAPAR-9	2.800 C	3.435 C	3.718 B	3.819 B	2.911 A
FEDEARROZ-174	4.801 A	5.045 A	5.102 A	5.061 A	2.862 A
FEDEARROZ-2000	4.920 A	5.044 A	5.149 A	4.945 A	2.470 B
FEDEARROZ-67	4.860 A	5.053 A	4.836 A	4.348 B	2.200 B
CNA-4164	2.489 C	2.856 C	2.883 C	2.610 C	1.988 B
CNA-8521	2.914 C	3.118 C	2.849 C	2.229 C	1.123 C
CV (%)	11,19				

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Deve-se destacar que na máxima saturação por Al^{3+} ($m=83\%$), todos os cultivares apresentaram reduções na produtividade de grãos (Tabela 3.15), mas mesmo assim, FEDEARROZ-68 e FEDEARROZ-174, se comportaram de forma semelhante a IAPAR-177 e IAPAR-9, que segundo Ryan, Dimatoso, Kochian (1993) e Parker (1995) são materiais que apresentam alto grau de tolerância à toxidez causada pelo Al^{3+} do solo. Para Ferreira et al. (1995), Macedo; Kinet e; Van Sint (1997), Fageria e Zimmermann (1998), Vicente, Rossiello, Pereira (1998b), essa maior tolerância ao Al^{3+} do solo, apresentada por cultivares brasileiros e colombianos, deve estar ligada às características genéticas destes materiais.

As linhagens CNA-4164 (Tolerante) e CNA-8521 (Sensível), apresentaram diferenças quanto ao produtividade de grãos (Tabela 3.15), concordando com os resultados apresentados por Guimarães et al. (2006) que as classificaram como tolerante e sensível ao Al^{3+} , respectivamente.

Com aumentos da saturação por Al^{3+} no solo a produtividade de todos os cultivares variaram significativamente ajustando a modelos polinomiais de segundo grau (Tabela 3.16), que permitiram estimar os pontos de máximas

produtividades entre $m = 20,0$ e $47,6$ % de saturação por Al^{3+} na CTC do solo. Os cultivares IAPAR-9, AIPAR-177, FEDEARROZ-68 e a linhagem CNA-4164 (Tolerante), foram os materiais que apresentaram maior tolerância, expressando sua produtividade a valores de saturação por Al^{3+} ($m = 47,6$; $45,7$; $36,9$ e $33,5\%$), respectivamente.

Esses materiais podem ser cultivados em áreas de solos ácidos e manter níveis adequados de produtividades sem a necessidade de se fazer investimentos em calagem do solo, o que onera bastante o custo de produção dos rizicultores, principalmente na Colômbia, o uso de corretivos de acidez ainda não faz parte da rotina de manejo e preparo do solo para produção.

Para os cultivares FEDEARROZ-174, FEDEARROZ-2000 e FEDEARROZ-67, os pontos de máxima produtividade, foram estimados para as saturações por Al^{3+} de $30,4$; $28,3$ e $25,0\%$, respectivamente; indicando tolerância intermediária ao Al^{3+} do solo. Já a linhagem CNA-8521, considerada sensível ao Al^{3+} a máxima produtividade foi obtida com 20 % de saturação (Tabela 3.16).

A produtividade (FERREIRA; SALGADO; JORGE, 1986; HORTZ; KLOTZ, 1990; VASCONCELLOS; ROSIELLO; JACOBE NETO, 2002; FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006) e o valor do ponto máxima tolerância para saturação por Al^{3+} no solo (OLMOS; CAMARGO, 1984; FERREIRA; SALGADO; JORGE, 1986) são utilizados por estes pesquisadores para diferenciar e classificar os cultivares de arroz quanto a tolerância aos efeitos tóxicos do Al^{3+} .

Considerando os resultados obtidos neste estudo, pode-se agrupar os genótipos avaliados da seguinte forma: grupo I (tolerantes ao Al^{3+}) = IAPAR-9, IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e CNA-4164; grupo II (medianamente tolerantes ao Al^{3+}) = FEDEARROZ-174, FEDEARROZ-2000 e FEDEARROZ-67, e grupo III (sensível ao Al^{3+}) = CNA-8521.

Pode-se assim indicar que os cultivares comerciais brasileiros se confirmaram ser tolerantes ao Al^{3+} do solo, porém entre cultivares os colombianos somente o FEDEARROZ-68 foi assim classificado, os demais foram considerados medianamente tolerantes.

Numa visão de futuro, pode-se afirmar que os genótipos colombianos avaliados apresentam grande variabilidade genética quanto a tolerância ao Al^{3+} do solo, podendo ser utilizados como referências em programas de melhoramento genéticos para seleção de cultivares de arroz adaptados ao cultivo de

sequeiro em áreas de solos ácidos, dispensando em grande parte, a necessidade de calagem para a correção da acidez destas áreas.

Tabela 3.16 - Equações de regressão polinomial para produtividade de grãos (PG) (kg ha^{-1}) de cultivares/linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão	R ²	Ponto de máximo
IAPAR-9	$\text{PG} = 2,749 + 0,0478m^{(1)} - 0,00051m^2$	0,93*	47,6
IAPAR-177	$\text{PG} = 3,040 + 0,0736m - 0,00081m^2$	0,99*	45,7
FEDEARROZ-68	$\text{PG} = 4,023 + 0,0518m - 0,00073m^2$	0,93*	36,9
CNA-4164	$\text{PG} = 2,489 + 0,0255m - 0,00038m^2$	0,99*	33,6
FEDEARROZ-174	$\text{PG} = 4,636 + 0,0505m - 0,00082m^2$	0,88*	30,4
FEDEARROZ-2000	$\text{PG} = 4,720 + 0,0524m - 0,00092m^2$	0,89*	28,3
FEDEARROZ-67	$\text{PG} = 4,757 + 0,0400m - 0,00083m^2$	0,96*	25,1
CNA-8521	$\text{PG} = 2,915 + 0,0200m - 0,00050m^2$	0,97*	20,0

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com os trabalhos de (FAGERIA, 2000, 2001), que também observou aumentos na produtividade de grãos de arrozais em áreas com valores mais baixos de pH, indicando que os cultivares de arroz de terras altas são bastante tolerantes à acidez do solo, produzindo satisfatoriamente sob pH do solo entre 4,6 até 6,2, concordando com este estudo com pH entre 4,73 e 5,27 (Tabela 1).

Assim os cultivares de arroz comerciais brasileiros apresentaram maior tolerância ao Al^{3+} do solo, porém tiveram valores médios de produtividade de grãos superiores na máxima saturação por Al^{3+} do que os cultivares comerciais colombianos a exceção do cultivar FEDEARROZ-68.

Desta forma, o cultivar IAPAR-177, foi quem registrou o melhor desempenho em condições de campo na máxima saturação por Al^{3+} (m=83%), isso aconteceu pelo fato do cultivar apresentar maior perfilhamento, porcentagem de colmos férteis, maior número de grãos cheios por panícula e menor número de espiguetas chochas, mas também, principalmente, por ele ser um cultivar tipo moderno de arroz sequeiro, mais adaptado a condições de baixa fertilidade de solo, maior tolerância ao Al^{3+} , porém seu potencial de produtividade de grãos. Os

resultados obtidos, corroboram com os apresentados por (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006; MACHADO, 1994) onde a produtividade de grãos da cultura de arroz, é definida pelos componentes de produção.

Para o índice de colheita (IC) que é uma medida que relaciona produção de massa de grãos com produção de MSPA, houve efeito significativo da interação entre a saturação por Al^{3+} no solo e os cultivares de arroz avaliados. No entanto, a relação grãos/parte aérea demonstra a eficiência de determinado cultivar na produtividade, sendo assim, quanto maior seu valor, maior sua eficiência ou índice de colheita (IC).

Na ausência do Al^{3+} ($m=0\%$), os maiores valores para o IC foram registrados para os cultivares de arroz colombianos FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-68 com valores de 0,481 e 0,478, respectivamente (Tabela 3.17). O menor IC (0,340) foi registrado para a linhagem CNA-4164, que diferiu dos demais cultivares testados.

Destacam-se os cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e IAPAR-9 (Tabela 3.17), que na máxima saturação por Al^{3+} no solo ($m=83\%$), produziram boas quantidades de grãos mesmo com baixa produção de MSPA o que resultou em bons índices de colheita com valores de 0,43; 0,42 e 0,40, respectivamente.

Tabela 3.17 - Valores médios para índice de colheita (IC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-177	0,40 C	0,45 A	0,46 A	0,46 A	0,43 A
FEDEARROZ-68	0,47 A*	0,47 A	0,47 A	0,47 A	0,42 A
IAPAR-9	0,38 D	0,41 B	0,42 B	0,42 B	0,40 A
FEDEARROZ-174	0,48 A	0,46 A	0,46 A	0,48 A	0,38 B
CNA-8521	0,37 D	0,36 C	0,35 D	0,35 D	0,29 D
FEDEARROZ-2000	0,43 B	0,41 B	0,42 B	0,42 B	0,33 C
CNA-4164	0,34 E	0,34 C	0,34 D	0,35 D	0,32 C
FEDEARROZ-67	0,41 C	0,40 B	0,39 C	0,40 C	0,28 D

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados reforçam a classificação dos cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e IAPAR-9 como tolerantes ao Al^{3+} do solo, uma vez que apresentaram características agrônômicas interessantes para alta produtividade com maior número de panículas/m² (Tabela 3.8), maior porcentagem de colmos férteis (Tabela 3.10) e alto índice de colheita (Tabela 3.17).

Quanto ao cultivar FEDEARROZ-67, apesar de ter apresentado a maior produção de MSPA entre os cultivares estudados (Tabela 3.4), foi baixa a sua produção de grãos e por consequência, o mais baixo índice de colheita, na máxima saturação por Al^{3+} , comprovando a classificação de material sensível ao Al^{3+} , não apresentado diferenças com a linhagem CNA-8521 sensível ao Al^{3+} .

Esses resultados indicam que considerar apenas a produção de MSPA não é suficiente para seleção de cultivares tolerantes ao Al^{3+} do solo, como no caso do cultivar FEDEARROZ-67 que apresentou maior produção de MSPA (Tabela 3.4), mas baixa produção de grãos (Tabela 3.15).

Em contrapartida, os cultivares IAPAR-177, FEDEARROZ-68 e IAPAR-9 produziram menor quantidade de MSPA (Tabela 3.4) e maior produção de grãos (Tabela 3.15), e bons índices de colheita (Tabela 3.17). Resultados superiores aos encontrados nesse trabalho foram citados por (FREITAS; FERNADES; MAIA, 2015) que avaliaram cultivares brasileiros de arroz de terras altas, cultivados em solo com saturação por Al^{3+} $m \geq 50\%$, os classificaram como tolerantes ao Al^{3+} , que apresentaram índices de colheita (IC) superior a 0,60 para sua classificação, respectivamente.

Isolando os efeitos das saturações por Al^{3+} no solo, foi possível observar que as variações do IC, ajustaram-se significativamente ao modelo quadrático de regressão (Tabela 3.18), indicando para cada cultivar reduções do IC a partir de valores específicos ou pontos de máxima tolerância ao Al^{3+} do solo (Tabela 3.18).

Os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177 devem ser destacado, uma vez que foram aqueles que mantiveram aumentos progressivos do IC até os maiores valores para pontos de máxima saturação por Al^{3+} do solo, ou seja, (47,25 e 47,06%), respectivamente (Tabela 3.18). Contrastando este fato observa-se que para a linhagem CNA-8521 e para o cultivar FEDEARROZ-2000, os pontos de máximo foram muito inferiores, ficando com valores de 10,3 e 22,4%, respectivamente (Tabela 3.18). Resultados que reforçam a classificação dos

cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177 como tolerantes, e o FEDEARROZ-2000 e a linhagem CNA-8521, como sensíveis ao Al^{3+} do solo.

Tabela 3.18 - Funções de regressão polinomial para ajuste da variação do índice de colheita (IC) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Regressão ⁽¹⁾	R ²	Ponto de Máximo
IAPAR-9	IC= 0,318 + 0,0019m - 0,00002m ²	0,99**	47,25
IAPAR-177	IC= 0,404 + 0,0029m - 0,000031m ²	0,99**	46,06
CNA-4164	IC= 0,339 + 0,0006m - 0,000009m ²	0,59*	33,22
FEDEARROZ-68	IC= 0,470 + 0,00103m - 0,000017m ²	0,78*	30,29
FEDEARROZ-67	IC= 0,403 + 0,00161m - 0,000032m ²	0,84*	24,06
FEDEARROZ-174	IC= 0,470 + 0,00117m - 0,000024m ²	0,66*	24,48
FEDEARROZ-2000	IC= 0,426 + 0,00116m - 0,000026m ²	0,80*	22,46
CNA-8521	IC= 0,377 + 0,00110m - 0,000011m ²	0,98*	10,33

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Além das variáveis já apresentadas e discutidas foi calculado também o índice de tolerância ao Al^{3+} do solo (IT) da forma indicada por Furlani e Furlani (1991) e Freitas et al. (2006). Entretanto deve-se ressaltar que no cálculo do IT considera-se apenas a relação percentual entre os valores de produtividade de grãos em ambientes com e sem o estresse por Al^{3+} .

Nas análises de variâncias para o IT ao Al^{3+} , foram observados efeitos significativos apenas para interação entre cultivares e saturação por Al^{3+} . Considerando os valores médios obtidos para o IT ao Al^{3+} (Tabela 3.19).

Não foram observadas diferenças entre cultivares quanto aos valores de IT para saturações por Al^{3+} de até 21% (Tabela 3.19). Esse fato pode ser atribuído a efeito benéfico das concentrações de Al^{3+} do solo que neutraliza cargas negativas da superfície de membrana das células do córtex das raízes e favorece a absorção de nutrientes aniônicos com os fosfatos, nitratos e sulfatos (TAYLOR, 1988; KINRAIDE; RYAN; KOCHIAN, 1992). Entretanto, deve-se destacar os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177 que produziram sempre mais que o tratamento controle sem Al^{3+} até a máxima saturação por Al^{3+} (83%) (Tabela 3.19). Resultados semelhantes foram apresentadas por Fernandes e Rossiello (1995).

Efeitos positivos da presença do Al^{3+} no solo em cultivares de arroz já foram evidenciados nos resultados apresentados por Vicente, Rossiello e Pereira (1998b), Fageria (2000), Freitas et al. (2006), Silva (2015). De acordo com Carvalho et al. (1995), os efeitos positivos do Al^{3+} estão associados aos mecanismos metabólicos das plantas que absorvem N preferencialmente na forma de nitratos e liberam OH^- que aumentam o pH próximo à superfície das raízes, diminuindo a solubilidade e a toxidez do alumínio do solo. Estes fatos também foram evidenciados nos estudos de Justino et al. (2006) e Silva et al. (2011) em cultivares de arroz.

Por outro lado, na maior saturação por Al^{3+} ($m=83\%$) foram observados para os genótipos FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-174, FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-2000, CNA-4164 e CNA-8521, reduções do IT ao Al^{3+} em relação ao tratamento controle (Tabela 3.19). Esses resultados estão de acordo com Vasconcellos, Rossiello e Jacobe-Neto (2002) e Freitas et al. (2006), que trabalhando com plantas de arroz e presença de Al^{3+} , também observaram reduções no índice de tolerância, independentemente dos cultivares considerados. Os cultivares IAPAR-177 e IAPAR-9 apresentaram os maiores valores de IT ao Al^{3+} correspondentes a 106,9 e 103,9%, respectivamente (Tabela 3.19), podendo considerá-los como tolerantes ao Al^{3+} .

Os cultivares Fedearroz-68 e Fedearroz-174 apresentaram IT com valores de 71,51 e 59,60%, respectivamente, e podem ser classificados como medianamente tolerantes ao Al^{3+} .

Os menores valores de IT ao Al^{3+} , foram registrados nos cultivares FEDEARROZ-2000, FEDEARROZ-67 e CNA-8521, indicando que a mesma é classificada como sensível ao Al^{3+} , concordando com os resultados apresentados por (BRESEGHELLO; CASTRO; MORAIS, 1998). Uma vez que o IT ao Al^{3+} ficou abaixo de 38,5%, considerado como limite de transição entre tolerância e sensibilidade.

Uma outra observação que deve ser levada em consideração é o fato de que nos tratamentos com 62 e 83% de saturações por Al^{3+} obrigatoriamente os valores da saturação por bases foram sempre baixos, menores que 14%, (Tabela 3.1), não sendo suficiente para criar o ambiente químico adequado para disponibilizar Ca^{2+} e Mg^{2+} em quantidades para atender a demanda das plantas de arroz, determinando baixas produtividades e baixos valores de IT ao Al^{3+} . Essas condições são semelhantes às dos solos ácidos das áreas sob savanas colombianas

ou cerrados brasileiros, responsáveis produtividades das culturas exploradas nestas áreas, quando em estado natural, como indica Cantarella e Furlani (1997), Fageria e Stone (1999) e Silveira et al. (2000).

Tabela 3.19 - Valores médios para índice de tolerância (IT %) para cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-9	100 A*	122,6 A	132,77 B	136,3 A	103,9 A
IAPAR-177	100 A	135,2 A	150,90 A	142,1 A	106,9 A
FEDEARROZ-68	100 A	110,0 A	115,64 C	110,4 B	71,5 C
FEDEARROZ-174	100 A	105,0 A	106,24 C	105,4 B	59,6 C
CNA-4164	100 A	114,7 A	115,81 C	104,8 B	79,8 B
FEDEARROZ-67	100 A	103,9 A	99,50 C	89,4 C	45,2 D
FEDEARROZ-2000	100 A	102,5 A	104,63 C	100,5 B	50,2 D
CNA-8521	100 A	106,9 A	97,77 C	76,5 C	38,5 D

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados obtidos, corroboram com aqueles apresentados por Briedis et al. (2012) e Fageria (2001), que avaliaram o desempenho de diferentes cultivares de arroz em solos ácidos e verificaram que os mesmos apresentaram baixas produtividades nos solos com saturação por bases inferiores a 20%.

Os cultivares IAPAR-177 e IAPAR-9, FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-174 e para a linhagem CNA-4164, foram semelhantes com aqueles apresentados por Tanaka, Ponte e Moraes (1983), que só obtiveram efeitos significativos para produtividade das culturas nas áreas com solos com mais de 56% de saturação por Al^{3+} , o que indica alto nível de tolerância dos cultivares avaliados ao alumínio do solo.

Em relação ao efeito isolado da saturação por Al^{3+} , as variações do IT se ajustaram significativamente a funções quadráticas (Tabela 3.20) com pontos de máximos estimados para saturações por Al^{3+} no solo, que variaram de $m=20,03\%$ (CNA-8521) até $m=44,35\%$ (IAPAR-177). O cultivar brasileiro IAPAR-177 foi o que

apresentou os maiores valores de IT independentemente da saturação por Al^{3+} considerada, chegando ao índice de 106,95% na máxima saturação testada (Tabela 3.19), indicando ser um genótipo com características fisiológicas superiores para a tolerância ao Al^{3+} .

Os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177 apresentaram pontos de máximo de IT para saturações por Al^{3+} no solo de 44,3 e 43,3%, respectivamente (Tabela 3.20), o que pode ser considerado como bom indicativo para utilização destes materiais em estudos subsequentes para transferência da tolerância ao Al^{3+} . Os cultivares FEDEARROZ-68, CNA-4164 e FEDEARROZ-174 apresentaram pontos máximos de IT para valores entre 33,9; 33,6 e 30,3% de saturação por Al^{3+} podendo ser considerados intermediariamente tolerantes ao Al^{3+} . A linhagem CNA-8521 apresentou o ponto máximo de IT para saturações por Al^{3+} de 20,03%, sendo considerado sensível ao Al^{3+} trocável do solo.

Tabela 3.20 - Funções de regressão polinomial para o índice de tolerância (IT) de cultivares e linhagens de arroz, em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

CULTIVARES	Regressão ⁽¹⁾	R ²	Ponto de Máximo
IAPAR-9	$IT = 98,18 + 1,703m - 0,0192m^2$	0,93**	44,35
IAPAR-177	$IT = 99,25 + 2,366m - 0,0273m^2$	0,99**	43,33
FEDEARROZ-68	$IT = 97,30 + 1,230m - 0,0181m^2$	0,93*	33,99
CNA-4164	$IT = 99,98 + 1,024m - 0,0152m^2$	0,99*	33,68
FEDEARROZ-174	$IT = 96,56 + 1,051m - 0,0173m^2$	0,88*	30,38
FEDEARROZ-2000	$IT = 95,93 + 1,065m - 0,0187m^2$	0,89*	28,48
FEDEARROZ-67	$IT = 97,88 + 0,824m - 0,0171m^2$	0,96*	24,09
CNA-8521	$IT = 100,03 + 0,689m - 0,0172m^2$	0,99**	20,03

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} . * e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

3.6 CONCLUSÕES

Os cultivares e linhagens de arroz de sequeiro de origem brasileira e colombiana diferem significativamente quanto aos efeitos do alumínio trocável do solo nas suas características biométricas e parâmetros fitotécnicos.

IAPAR-177 e IAPAR-9 foram os cultivares de arroz que apresentaram os maiores níveis de tolerância ao alumínio do solo (até 43%).

Cultivares de arroz de origem colombiana são menos tolerantes ao alumínio do que os genótipos brasileiros, a exceção do cultivar Fedearroz-68, que apresentou a maior tolerância ao alumínio, distinguindo-se dos demais.

O índice de tolerância (IT) e o índice de colheita (IC) são variáveis adequadas para fazer a distinção entre cultivares de arroz, sensíveis e tolerantes ao alumínio do solo.

4 ARTIGO B

COMPORTAMENTO NUTRICIONAL DE CULTIVARES DE ARROZ DE SEQUEIRO EM SOLO COM DIFERENTES SATURAÇÕES POR ALUMÍNIO

4.1 RESUMO

A cultura do arroz sequeiro de forma geral apresenta menor produtividade de grãos tendo entre as várias causas, o cultivo em solos de baixa fertilidade, com altos níveis de alumínio tóxico e baixo uso de insumos agrícolas. Em função do exposto, o trabalho teve por objetivo avaliar as respostas de cultivares de arroz, brasileiros e colombianos, quanto aos teores e acúmulos de N, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ em função de diferentes saturações por Al³⁺ no solo. Os experimentos foram conduzidos em condições de campo em San Luis de Palenque, Casanare, Colômbia (5° 15' de Latitude N e 71° 55' de longitude O, altitude de 240 m) nos anos agrícolas 2014 e 2015. Os materiais de origem brasileira foram provenientes do programa de melhoramento genético de Embrapa-Arroz e Feijão e do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), os de origem colombiana foram provenientes da Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ). O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 5x8, em que os fatores foram cinco saturações por Al³⁺ (0, 21, 43, 62 e 83%) e oito cultivares/linhagem de arroz (quatro de origem brasileiro: IAPAR-9, IAPAR-177, CNA-4164 (tolerante ao Al³⁺) e CNA-8521 (sensível ao Al³⁺) e quatro cultivares de origem colombiana: FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-2000). A saturação por alumínio reduziu significativamente os teores e acúmulos de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na matéria seca da parte aérea dos genótipos de arroz avaliados, exceto para teores de fósforo. A produtividade de grãos correlacionou positivamente com os acúmulos de N, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ na massa seca de parte aérea, podendo ser considerada como variável auxiliar na avaliação e seleção de genótipos de arroz cultivados em solos com diferentes saturações por alumínio.

Palavras Chave: *Oryza sativa*. Acidez do solo. Acúmulo de nutrientes.

NUTRITIONAL BEHAVIOR OF UPLAND RICE CULTIVARS IN SOIL WITH DIFFERENT ALUMINUM SATURATION

4.2 ABSTRACT

The upland rice crop generally presents low grain yield among the various causes, the cultivation in soils of low fertility with high levels of toxic aluminum in the solution and the low use of agricultural inputs. The objective of this study was to study the responses of Brazilian and Colombian rice cultivars, as well as the N, P, K, Ca and Mg content as a function of different saturations for Al^{3+} in the soil. The experiments were conducted in San Luis de Palenque, Casanare, Colombia (5° 15' of Latitude N and 71° 55' of longitude O, with an altitude of 240 m) in the agricultural years of 2014 and 2015. The materials of Brazilian origin came from the breeding program of Embrapa-Rice and Beans and from the Agronomic Institute of Paraná (IAPAR), the Colombian origin came from the national federation of rice farmers (FEDEARROZ). The experimental design used was completely randomized with four replicates in a 5x8 factorial scheme, in which the factors were five saturations for Al^{3+} (0, 21, 42, 63 and 83%) and eight cultivars/rice lineages, four cultivars of Brazilian origin: IAPAR-9, IAPAR-177, CNA-4164 (Tolerant to Al^{3+}) and CNA-8521 (Sensitive to Al^{3+}), and four cultivars of Colombian origin, FEDEARROZ-68, FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-174 and FEDEARROZ-2000. Aluminum saturation significantly reduced the content and accumulation of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in rice cultivars studied, except for the nutrient P that did not present significant differences in the MSPA content in the evaluated rice cultivars. The grain yield correlated positively with the N, P, K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} accumulations in the aerial part dry mass, and could be considered as an auxiliary variable in the evaluation and selection of rice genotypes cultivated in soils with different saturations by aluminum.

Keywords: *Oryza sativa*. Acidic soils. Accumulation of nutrients

4.3 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é alimento que faz parte da dieta de aproximadamente metade da população mundial (KUMAR; LADHA, 2011). A maior parte da área cultivada com este cereal fica na Ásia, onde se adota predominantemente o sistema de cultivo irrigado por inundação (PRASAD, 2011). No entanto, a redução da disponibilidade dos recursos hídricos para a irrigação da cultura devido ao aumento do consumo industrial e humano, tem exigido a busca por alternativas que possibilitem o cultivo do arroz com maior economia de água. Como alternativa tem-se o cultivo de arroz de terras altas, que pode ser no sistema irrigado por aspersão ou do sequeiro, dependendo do volume pluviométrico da área ou região de cultivo (CRUSCIOL et al., 2013; NASCENTE et al., 2013).

A tolerância ao Al^{3+} pode variar dentro ou entre espécies, sendo que as tolerantes, geralmente, apresentam mecanismos que permitem o crescimento e desenvolvimento normal da planta após exposição ao Al^{3+} (GIANNAKOULA et al., 2010). A forma de octaedro hexahidratado, $Al(H_2O)_6^{3+}$, mais conhecida como Al^{3+} , é predominante em soluções com pH abaixo de 5,0, na referida faixa de pH, cerca de 90% do alumínio é considerada a forma mais tóxica para as plantas (DELHAIZE; RYAN, 1995).

Dentre as culturas vegetais de grande importância econômica, o arroz se destaca por apresentar cultivares com ampla variação de tolerância ao alumínio (FAGERIA; WRIGHT; BALIGAR, 1988; MA; RYAN; DELHAIZE, 2001). A utilização de técnicas bioquímicas, moleculares e anatômicas torna possível a avaliação e visualização da intensidade dos danos causados pelo Al^{3+} no metabolismo das plantas, que, conseqüentemente, podem auxiliar a identificação de possíveis mecanismos de tolerância.

Neste sentido, Freitas et al. (2006) estudaram a tolerância de genótipos de arroz ao Al^{3+} e sugeriram que é possível selecionar de forma indireta plantas tolerantes com maior absorção de P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , e K^+ considerando apenas o desenvolvimento radicular, pois, a presença de Al^{3+} debilita e reduz o crescimento das raízes, em plantas sensíveis, reduzindo a absorção destes nutrientes. De forma geral, a intensidade dos danos causados pelo Al^{3+} é dependente do estágio de desenvolvimento da planta, da concentração desse metal no substrato e do nível de tolerância da planta (MA; RYAN; DELHAIZE, 2001; MERIGA et al., 2004; TAHARA

et al., 2008).

Embora sejam conhecidos alguns cultivares de arroz tolerantes ao Al^{3+} , novos materiais são lançados periodicamente, fazendo necessário repetições dessa avaliação. Contudo, não há consenso entre os pesquisadores acerca dos parâmetros mais adequados para distinguir variações específicas entre genótipos de arroz quanto a tolerância ao alumínio do solo. Sendo assim, justifica-se a realização periódica de estudos para quantificar e diferenciar os cultivares de arroz quanto a tolerância ao alumínio, bem como seus efeitos na nutrição de plantas de arroz cultivadas em áreas ou regiões de solos ácidos. Segundo Guimarães et al. (2007), a identificação de germoplasma capaz de utilizar os nutrientes menos disponíveis no solo se constitui em importante estratégia de baixo custo para promover a sustentabilidade da agricultura das regiões marginalizadas.

Assim, na cultura do arroz de terras altas os dados em campo sobre os efeitos da saturação por Al^{3+} no acúmulo de nutrientes ainda são escassos, por isso esse trabalho foi realizado como o objetivo de avaliar o comportamento nutricional de cultivares de arroz brasileiros e colombianos cultivados em solos com diferentes valores de saturação por Al^{3+} .

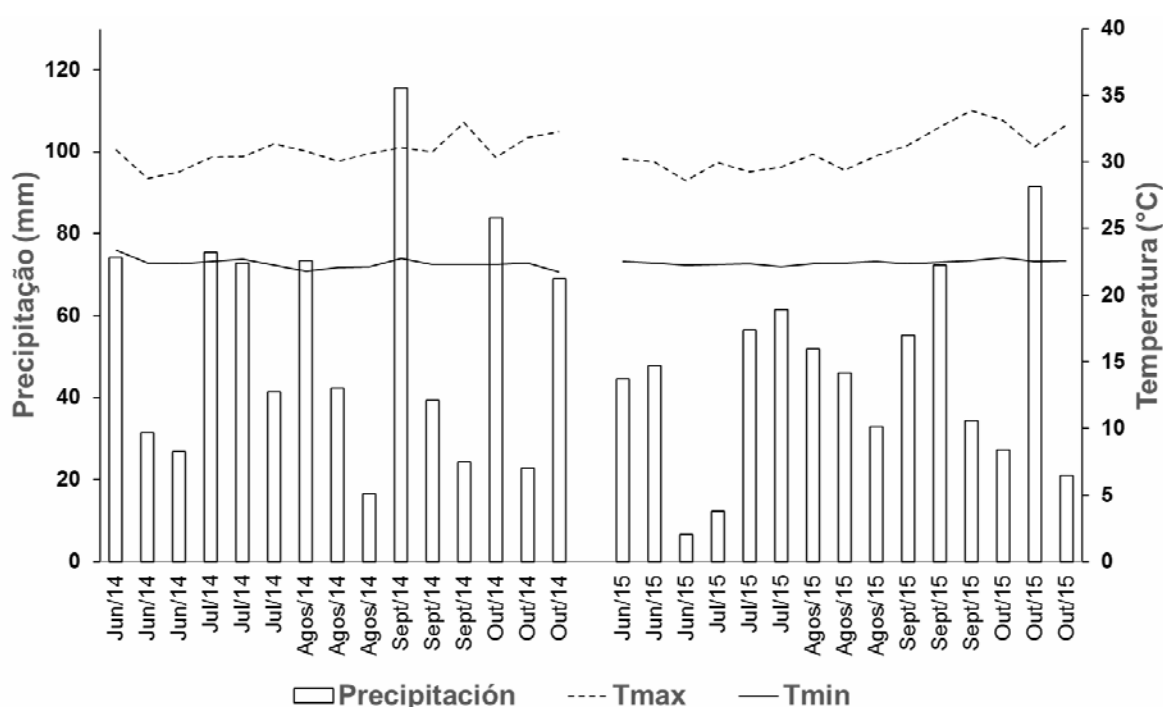
4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado durante as safras agrícolas de 2014 e 2015 no município de San Luis de Palenque, Casanare, Colômbia, situado a aproximadamente 5° 15' de Latitude Norte e 71° 55' de longitude Oeste, com altitude de 240 m. O clima característico da região é bosque húmido tropical (bh-T), segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 2350 mm, e a temperatura média anual é de 23,5°C com umidade relativa do ar média anual variando 70 e 80%. Adicionalmente foi feita a avaliação periódica das temperaturas e precipitações médias da área experimental (Figura 4.1), utilizando dados e registros obtidos junto a estação meteorológica da Federação Nacional de Arrozeiros-Fondo Nacional del Arroz (FEDEARROZ-FNA) situada na cidade de San Luis de Palenque, distante cerca de 7,0 km da área experimental.

Antes da instalação dos experimentos foram coletadas amostras de terra na profundidade de 0-20 cm para a caracterização química do solo (Tabela 4.1), seguindo as metodologias descritas pelo Instituto Geografico Agustin Codazzi

(2006). O solo da área experimental foi classificado como Oxic Dystrudepts (IGAC, 2014), que utiliza o sistema americano de classificação de solos (DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2010), e se caracteriza como solo de baixa fertilidade natural com alto teor de Al^{3+} trocável, contendo 490 e 450 $g\ kg^{-1}$ de areia, 240 e 280 $g\ kg^{-1}$ de argila e 270 e 260 $g\ kg^{-1}$ de silte nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente.

Figura 4.1 - Variações médias das temperaturas máxima e mínima e distribuição das precipitações durante os períodos de execução dos experimentos por decêndio nas safras 2014 e 2015. San Luis de Palenque, Casanare, Colômbia.



Fonte: Elaboração do autor.

Após as análises químicas e antes da instalação do experimento em campo foi realizado um experimento prévio de incubação em vasos, utilizando sais puros de $CaCO_3$ e $MgCO_3$, para definição das doses de calcário a aplicar e criar diferentes níveis de saturação de Al^{3+} no solo. Encerrado o período de 84 dias de incubação, a terra dos vasos foi novamente amostrada e analisada para obter a curva de neutralização do Al^{3+} . Com base na curva de regressão obtida, foi definida as doses de calcário aplicar na área experimental para criar valores de saturação de Al^{3+} próximos de 0, 20, 40, 60 e 80%.

O solo das parcelas experimentais foi preparado em condições

adequadas de umidade, procedendo-se duas gradagens na profundidade de 20 cm e a utilização da plaina niveladora visando obter um micro nivelamento adequado. O calcário nas quantidades definidas para cada parcela experimental foi distribuído a lanço e incorporado com grade nivelado na camada superficial de 0-20 cm, no dia 11/02/2014. O calcário magnesiano utilizado apresentava 84% de PRNT e continha 35,6% de CaO e 10,5% de MgO.

Tabela 4.1 – Resultados médios das análises químicas do solo, na profundidade de 0-20 cm das parcelas experimentais após a calagem, antes das instalações dos experimentos de campo dos anos 2014 e 2015.

Sat. Al (m=%)	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Ca -----	Mg -----	K cmol _c dm ⁻³	Al -----	T	V %	MO g.kg ⁻¹
0	5,27±0,3*	2,89±0,3	4,81±0,4	1,32±0,05	0,11±0,01	0,04±0,02	11,70±0,9	53,47±1,3	11,11±0,5
22	5,02±0,2	2,77±0,6	3,54±0,5	0,97±0,11	0,13±0,03	1,29±0,09	11,72±0,8	39,64±2,1	11,24±0,4
41	4,73±0,3	2,84±0,5	2,31±0,4	0,64±0,15	0,10±0,02	2,12±0,12	12,58±1,3	24,22±1,9	11,17±0,5
62	4,53±0,2	2,73±0,4	1,57±0,6	0,43±0,18	0,13±0,04	3,25±0,17	15,30±1,1	13,94±1,7	11,12±0,6
83	4,31±0,1	2,82±0,3	0,65±0,1	0,18±0,07	0,12±0,02	4,90±0,14	16,15±0,4	5,81±0,6	11,07±0,4

*± desvio padrão

Fonte: Elaboração do autor.

As sementeiras do arroz foram realizadas nos dias 01/06/2014 (Experimento I) e 09/06/2015 (Experimento II), utilizando uma semeadora tratorizada com espaçamento de 0,17 m entre sulcos apenas para demarcação das linhas. A densidade da sementeira foi de 150 kg ha⁻¹. As sementes foram distribuídas manualmente, visando obter stand final de 80 a 85 plantas por metro linear.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos resultaram de um fatorial 8x5 em que os fatores foram oito genótipos de arroz e cinco concentrações de saturação por Al³⁺. Os genótipos de arroz avaliados foram: i) quatro de origem brasileira: as linhagens CNA-4164 (tolerante ao Al³⁺) e CNA-8521 (sensível ao Al³⁺) provenientes do banco ativo de germoplasma da Embrapa Arroz e Feijão, e os cultivares IAPAR-9 e IAPAR-177; ii) quatro cultivares comerciais de origem colombiana: FEDEARROZ-68,

FEDEARROZ -174, FEDEARROZ -67 e FEDEARROZ -2000. As cinco taxas de saturação da CTC do solo por Al^{3+} foram: 0; 21; 43; 62 e 83%.

A adubação básica nos sulcos de semeadura foi realizada mediante a aplicação de 150 kg ha^{-1} da fórmula 10-30-10 e foi definida de acordo com as características químicas do solo, levando-se em consideração as recomendações de Castilla (2011). Adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada três vezes realizadas aos 15, 30 e 45 dias após a emergência (DAE), computando no total a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N, utilizando a uréia como fonte de nitrogênio. A aplicação do fertilizante nitrogenado foi realizada de forma manual em cobertura superficial, mediante aplicação a lanço.

As parcelas experimentais foram constituídas por 30 linhas de 5 m de comprimento, espaçadas 0,17 m. A área útil foi constituída pelas linhas centrais desprezando-se duas linhas laterais e 0,50 m em ambas das extremidades de cada linha. Para amostragem das plantas de arroz foi adotada a metodologia recomendada por Dobermann e Fairhurst (2000).

A colheita foi realizada manualmente na área útil das parcelas experimentais, nas datas 04/10/2014 e 15/10/2015, quando os grãos apresentavam teor médio de umidade de 25%.

Para avaliar o comportamento nutricional diferencial das cultivares de arroz em função da saturação por Al^{3+} no solo, foram feitas às seguintes avaliações: a) análises químicas do solo (pH, Carbono orgânico, P, K^+ , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) para avaliação da fertilidade do solo, b) produção de massa seca de parte aérea (MSPA), foi obtida após secagem em estufa de circulação forçada de ar mantida à temperatura constante de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, por um período mínimo de 96 horas, c) determinação dos teores e conteúdos de N, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} na MSPA, seguindo procedimentos e metodologia descrita por IGAC (2006); e c) produtividade de grãos (kg ha^{-1}), corrigida para 13% de umidade.

4.4.1 DESCRIÇÃO DE CULTIVARES

4.4.1.1 Fedearroz-68

O cultivar FEDEARROZ-68 foi selecionado e lançado em 2016 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Planta de porte baixo

(85 - 105 cm), moderadamente resistente ao acamamento. O perfilhamento é intermediário, o ciclo é semiprecoce (98 - 108 dias), o período entre a emergência e o florescimento varia de 65 a 75 dias e os grãos são do tipo longo fino. Apresenta tolerância à brusone (*Pyricularia grisea*) e ao vírus de folha branca (RVHB), porém é susceptível a *Rhizoctonia solani*. Apresenta ainda estabilidade de produção e bom desenvolvimento mesmo em solos de baixa fertilidade. A densidade de semeadura recomendada é de 100 a 150 kg ha⁻¹ para plantio em sulcos e de 160 a 180 kg ha⁻¹ para distribuição a lanço.

4.4.1.2 Fedearroz-67

O cultivar FEDEARROZ-67 resultou do cruzamento entre os genótipos LV1063-7-3-MV-4 X FLO3174-8P-7-2P-2P-M, foi lançado em 2016 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Planta de porte médio (120-130 cm) e ciclo vegetativo médio (116-125 dias). Apresenta alto perfilhamento, porém é resistente ao acamamento. Período entre a emergência e o florescimento varia de 75 a 83 dias, e os grãos são do tipo longo fino (agulhinha). É moderadamente sucessível a brusone e susceptível a *Rhizoctonia solani*. Sensível ao déficit hídrico e exige bom manejo da água. Apresenta sensibilidade ao herbicida clomazone. A densidade recomendada é de 100 a 130 kg ha⁻¹ para semeadura em sulcos e de 150 a 160 kg ha⁻¹, para semeadura a lanço.

4.4.1.3 Fedearroz-174

O cultivar FEDEARROZ-174 proveniente do cruzamento entre os genótipos CT10992-3-4-1T-3P-2P-3/ICTA PAZOS X ICTA COLOMGUA, foi lançado em 2007 pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Porte intermediário (115 - 135 cm), ciclo intermediário (118 - 128 dias), alto perfilhamento efetivo (85 - 90%), e é resistente ao acamamento. Período entre a emergência e o florescimento varia de 78 a 85 dias. Os grãos são de tipo longo fino. Tolerante a brusone (*Pyricularia grisea*) e susceptível a bactéria *Burkholderia glumae*. É um cultivar considerado rústico, selecionado para tolerância ao déficit hídrico. Apresenta estabilidade de produção, e é adaptado ao cultivo em solos com baixos níveis de

fertilidade. A densidade recomendada é de 100 a 130 kg ha⁻¹ para de semeadura em sulcos e de 150 a 180 kg ha⁻¹ para semeadura a lanço.

4.4.1.4 Fedearroz-2000

O cultivar FEDEARROZ-2000, resultado do cruzamento entre os genótipos P3084-F4-56-2-2/P3844-F3-19-1-1B-1x e CT8154-1-9-2, foi lançado em 2000, pela Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Colômbia. Apresenta porte médio (120-130 cm), ciclo é médio (116-118 dias), alto perfilhamento e tolerância ao acamamento. O período entre a emergência e o florescimento varia de 82-85 dias, apresentando alta estabilidade e adaptabilidade de produção e os grãos são de tipo longo fino (agulhinha). Susceptível a brusone (*Pyricularia griseae*), *Rhizoctonia solani* e à bactéria *Burkholderia glumae*, porém apresenta alta resistência ao vírus de folha branca (RVHB). Moderadamente exigente em fertilidade do solo. A densidade recomendada é 120 a 130 kg ha⁻¹ para semeadura em sulcos e de 150 a 170 kg ha⁻¹ para semeadura a lanço.

4.4.1.5 IAPAR-9

O cultivar IAPAR-9 foi selecionado e lançado em 1983 pelo Instituto agrônomo do Paraná (IAPAR), Brasil, resultado do cruzamento IAC-F-3-7 X BATATAIS 83. Apresenta porte alto (121 - 131 cm), moderadamente suscetível ao acamamento. O perfilhamento é intermediário, o ciclo é médio (125 - 130 dias), o florescimento varia de 88 a 93 dias a partir da emergência das plantas e os grãos são do tipo longo fino. Apresenta tolerância à brusone (*Pyricularia griseae*) e toxicidade por Fe. Apresenta estabilidade de produção e bom desenvolvimento em solos de baixa fertilidade.

4.4.1.6 Linhagens CNA-4164 e CNA-8521

As linhagens são provenientes do banco ativo de germoplasma da EMBRAPA arroz e feijão, e foram desenvolvidas através de um programa de retrocruzamentos, iniciado em 1995, entre cultivares comerciais e fontes de resistência à brusone. Em 1998 as linhagens foram submetidas a novas avaliações

para resistência à brusone em canteiros, e para outras características agrônomicas como, ciclo, altura de planta, resistência ao acamamento, produtividade e qualidade de grãos, em ensaios conduzidos em Goiás. De acordo com Guimarães et al (2006) a linhagem CNA-4164 e CNA-8521 foram selecionadas como tolerante e sensível ao alumínio respectivamente, sendo selecionadas pelo índice de susceptibilidade do crescimento radicular, na avaliação da resistência diferenciada das linhagens à toxicidade do alumínio.

4.4.2 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise conjunta de experimentos. O agrupamento dos dados foi feito, considerado a ordem de grandeza dos quadrados médios residuais das análises dos experimentos individuais, de acordo com as recomendações de Banzatto e Kronka (1989), ou seja, para agrupar e realizar a análise conjunta de experimentos os quadrados médios residuais não podem ultrapassar uma relação aproximada de 7:1. Satisfeitas essas condições foi então realizada às análises conjuntas dos dados originais dos dois experimentos realizados em 2014 e 2015. Os cultivares foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, enquanto os efeitos das saturações por Al^{3+} foram avaliados por meio de ajustes de regressões polinomiais, utilizando o programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância indicou significância apenas para os efeitos principais de cultivares e saturação por Al^{3+} . O fator ano de cultivo e suas interações não foi significativo para quaisquer das variáveis avaliadas (Tabela 4.2).

As diferenças entre os cultivares de arroz foi significativa para todas as variáveis avaliadas, evidenciando grande variabilidade genética no controle da absorção de nutrientes pelas plantas de arroz cultivadas sob condições de estresse por alumínio do solo.

Tabela 4.2- Probabilidade do teste F para os teores e acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} , safras 2014 e 2015

Fontes de Variação	PROBABILIDADE DO TESTE F									
	N		P		K		Ca		Mg	
	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo
Anos (A) 2014-2015	0,16	0,25	0,732	0,801	0,621	0,578	0,792	0,831	0,564	0,733
Cultivares (C)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sat. Alumínio % (m)	<0,001	<0,001	0,591	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
A*C	0,985	0,812	0,619	0,423	0,612	0,724	0,533	0,622	0,811	0,931
A*m	0,693	0,77	0,987	0,367	0,573	0,638	0,476	0,571	0,644	0,644
m*C	0,877	1	0,239	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
A*C*m	0,936	1	1	0,732	0,734	0,842	0,723	0,896	0,861	0,752
C.V(%)	10,63	23,06	14,87	16,93	18,08	20,01	16,34	21,67	15,46	20,3

Fonte: Elaboração do autor.

Constatou-se também que houve efeito significativo da saturação por Al^{3+} para todos os nutrientes, exceto para o teor de P da massa seca de parte aérea (MSPA). A interação entre cultivar e saturação por alumínio foi significativa para o conteúdo de P e para teores e conteúdos de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} da MSPA (Tabela 4.2).

A ausência de significância para interação entre cultivares e saturação por Al^{3+} (C*m) para teores e conteúdos de nitrogênio na MSPA (Tabela 4.2), está de acordo com os resultados apresentados por (SILVA, 2007, FREITAS; FERNANDES; MAIA, 2015).

Os teores de N da MSPA dos cultivares de arroz diminuíram significativamente com o aumento da saturação por Al^{3+} no solo (Tabela 4.3). O cultivar IAPAR-177 apresentou o maior teor de N tanto na ausência como na máxima saturação por Al^{3+} ($m=83\%$). Os menores valores foram registrados para o cultivar FEDEARROZ-174.

Tabela 4.3- Médias gerais e equações de regressão para teor e acúmulo de nitrogênio (N) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, 2014 e 2015.

Teor de Nitrogênio					
CULTIVARES	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	----- g kg ⁻¹ -----				
IAPAR-177	26,4 A ⁽¹⁾	27,1 A	25,5 A	24,3 A	22,7 A
IAPAR-9	24,2 AB	25,7 AB	23,4 AB	22,8 AB	20,2 AB
CNA-4164	23,2 AB	24,1 AB	22,1 AB	21,2 AB	19,0 AB
CNA-8521	23,9 AB	21,8 B	20,9 AB	19,4 AB	18,6 AB
FEDEARROZ-67	22,5 AB	21,7 B	21,1 AB	20,4 AB	18,5 AB
FEDEARROZ-2000	21,7 AB	20,6 B	19,4 B	18,3 B	17,9 AB
FEDEARROZ-174	21,1 B	21,5 B	20,6 AB	19,4 AB	17,6 B
FEDEARROZ-68	22,2 AB	22,5 AB	21,6 AB	21,5 AB	19,5 AB
	C.V. (%)=10,63			DMS=5,031	
	Equação de regressão⁽²⁾				R²
	Teor de nitrogênio= 23,709 - 0,0481*m				0,927*
Conteúdo de Nitrogênio					
	----- kg ha ⁻¹ -----				
IAPAR-177	120,8 AB ⁽¹⁾	135,5 A	133,7 A	122,1 A	98,1 A
IAPAR-9	109,9 AB	125,2 A	116,4 A	119,3 A	88,1 AB
CNA-4164	112,3 AB	130,1 A	122,0 A	100,7 AB	78,0 AB
CNA-8521	115,9 AB	121,5 A	109,9 A	80,2 B	36,7 B
FEDEARROZ-67	156,1 A	162,4 A	155,5 A	131,7 A	100,9 A
FEDEARROZ-2000	134,7 AB	145,8 A	137,7 A	123,8 AB	90,5 A
FEDEARROZ-174	111,1 AB	125,2 A	124,3 A	105,6 AB	81,3 AB
FEDEARROZ-68	101,3 B	116,9 A	113,2 A	107,2 B	79,7 AB
	C.V.(%)=23,06			DMS=51,415	
	Equação de regressão⁽²⁾				R²
	Conteúdo de nitrogênio = 121,51+0,8035m - 0,0155m ²				0,99**

(1) médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. (2) m, saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1%, 5%, respectivamente.

Os maiores teores de N da MSPA foram obtidos com o cultivar IAPAR-177, provavelmente devido a seleção de características desejáveis incluídas no programa de melhoramento genético de cultivares modernos, com vistas na criação de materiais com maior capacidade produtiva de grão (EMBRAPA, 2001). Os teores de N da MSPA obtidos neste estudo para a linhagem CNA-8521 diferem das observações de Fageria e Carvalho (1982), que indicam que cultivares de arroz sensíveis à toxidez de Al^{3+} apresentam teores de N na MSPA de 3 a 4 vezes maior que os valores obtidos com cultivares tolerantes.

Avaliando a relação direta entre a saturação por Al^{3+} e o teor de N na MSPA verifica-se uma diminuição linear e significativa desta variável para todas as cultivares de arroz, com uma taxa de decréscimo de $0,0481 \text{ g kg}^{-1}$ para cada 1% de aumento da saturação por Al^{3+} do solo (Tabela 4.3). O conteúdo de N na MSPA das plantas de arroz também foi influenciado pela saturação por Al^{3+} (Tabela 4.3), entretanto houve incremento da quantidade total absorvida em razão do incremento na produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 4.4). Os cultivares FEDEARROZ-67, IAPAR-177 e FEDEARROZ-2000 foram mais eficientes em acumular N na MSPA, independentemente da saturação por Al^{3+} no solo, o que é de fundamental importância para garantir a nutrição das plantas e melhorar a qualidade de grãos produzidos (ROSOLEM; WERLE; GARCIA, 2010).

Tabela 4.4 - Valores médios de massa seca de parte aérea (MSPA) (kg ha^{-1}) de cultivares/linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
FEDEARROZ-67	6.875 A*	7.387 A	7.285 A	6.377 A	5.417 A
FEDEARROZ-2000	6.365 A	7.008 A	7.016 A	6.690 A	4.990 A
FEDEARROZ-174	5.187 B	5.801 B	5.955 B	5.356 B	4.576 B
IAPAR-9	4.525 B	4.855 B	5.000 B	5.198 B	4.332 B
IAPAR-177	4.538 B	4.959 B	5.203 B	4.994 B	4.306 B
CNA-4164	4.794 B	5.370 B	5.523 B	4.746 B	4.074 B
FEDEARROZ-68	4.521 B	5.136 B	5.186 B	4.955 B	4.057 B
CNA-8521	4.819 B	5.527 B	5.225 B	4.114 B	1.957 C

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: Elaboração do autor.

O aumento do acúmulo de N na MSPA das plantas de arroz em função da saturação por Al^{3+} no solo, ajustou-se significativamente a uma função quadrática (Tabela 4.3), estima o ponto de máximo acúmulo de N com valor de ($131,92 \text{ kg ha}^{-1}$) ocorrendo para uma saturação por Al^{3+} de $m=25,91\%$.

Na Tabela 4.2 estão os resultados da análise de variância para os teores e acúmulo de fósforo na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos. Verificou-se que houve efeito significativo para os cultivares de arroz nos teores de fósforo, enquanto a saturação por Al^{3+} (m) não foi significativa. Notou-se ainda efeitos significativos para as saturações por Al^{3+} (m), cultivar (C) e da interação entre os fatores (m*C) para o acúmulo de fósforo.

Os aumentos nos teores de P na MSPA ocorreram devido ao efeito concentração (Tabela 4.5), uma vez que simultaneamente houve reduções na produção de MSPA em função dos aumentos das saturações por Al^{3+} no solo (Tabela 4.4). Esses resultados estão de acordo com os apresentados por (FREITAS; FERNANDES; MAIA, 2015; SILVA; 2007).

Os teores de P da MSPA das plantas de arroz do cultivar IAPAR-9 foram superiores em relação aos demais, para todos os níveis de saturação por Al^{3+} testados (Tabela 4.5). Os menores valores foram observados para o cultivar FEDEARROZ-68, tanto na ausência ($m=0\%$) como na máxima saturação por Al^{3+} ($m=83\%$). A variação dos teores de P do cultivar IAPAR-9, contrasta com os resultados obtidos por Mauad et al. (2004), que verificaram que os cultivares de arroz do grupo moderno apresentavam maiores teores foliares de P. Segundo os autores, esse comportamento se deve à maior capacidade dos materiais desse grupo absorverem o P em solos previamente corrigidos. Os resultados deste estudo indicam que o IAPAR-9 absorve mais P em comparação com outros materiais, mesmo em situação de solo não corrigido e com altos teores de Al^{3+} trocável.

De maneira geral, observando só as médias dos cultivares de arroz, deve-se destacar que tanto na ausência como na presença de Al^{3+} , os cultivares de arroz brasileiros apresentaram os maiores teores de P (Tabela 4.5), tendo assim, os menores valores nos cultivares de arroz colombianos.

Tabela 4.5- Médias gerais de teor e conteúdo de fósforo na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Teor de fósforo					
CULTIVARES	Saturação por Al ³⁺ (%)				
	0	21	43	62	83
	-----g kg ⁻¹ -----				
IAPAR-177	2,36 AB	2,41 AB	2,43 AB	2,49 AB	2,51 AB
IAPAR-9	2,58 A ⁽¹⁾	2,60 A	2,61 A	2,65 A	2,69 A
CNA-4164	2,23 AB	2,31 AB	2,39 AB	2,43 AB	2,47 AB
CNA-8521	2,30 AB	2,43 AB	2,27 AB	2,28 AB	2,26 AB
FEDEARROZ-67	1,91 AB	1,95 AB	2,06 AB	2,13 AB	2,12 AB
FEDEARROZ-174	1,84 B	1,86 B	1,92 AB	1,96 AB	2,03 AB
FEDEARROZ-2000	1,86 B	1,85 B	1,94 AB	1,99 AB	2,01 AB
FEDEARROZ-68	1,75 B	1,78 B	1,85 B	1,87 B	1,88 B
	C.V.(%)= 14,87			DMS=0,697	
	Equação de regressão ⁽²⁾				R ²
	Teor de fosforo= 2,144-0,0014m				ns*
Conteúdo de fósforo					
CULTIVARES	Saturação por Al ³⁺ (%)				
	0	21	43	62	83
	-----kg ha ⁻¹ -----				
IAPAR-9	11,76 AB	12,61 AB	12,96 AB	13,86 AB	11,71 A
FEDEARROZ-67	13,05 A*	14,58 A	15,16 A	13,67 A	11,54 A
IAPAR-177	10,71 AB	11,91 AB	12,59 AB	12,49 AB	10,73 A
CNA-4164	10,64 AB	12,29 AB	13,22 AB	11,39 B	10,01 A
FEDEARROZ-2000	11,83 AB	13,01 AB	13,66 AB	13,25 A	9,79 A
FEDEARROZ-174	9,47 AB	10,83 AB	11,42 AB	10,60 AB	9,25 A
FEDEARROZ-68	7,93 B	9,19 B	9,57 B	9,33 AB	7,64 AB
CNA-8521	11,02 AB	13,30 AB	12,01 AB	9,28 B	4,36 B
	C.V. (%)= 17,21			DMS=4,260	

⁽¹⁾ Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Para o conteúdo de P (Tabela 4.5), quando considerados os cultivares de arroz, na ausência de Al³⁺ (m=0%), o menor valor foi observado para o cultivar colombiano FEDEARROZ-68, já na máxima saturação (m=83%) os menores valores foram registrados para a linhagem CNA-8521 (sensível ao Al³⁺).

Analisando as tabelas de teor e acúmulo de P (Tabela 4.5) os menores teores foliares de P dos cultivares colombianos, não influenciaram o acúmulo de P na máxima saturação por Al³⁺ do solo (m=83%), a exceção da

linhagem CNA-8521, evidenciando que os cultivares colombianos produziram mais fitomassa área (Tabela 4.4), promovendo a diluição (denominado efeito diluição) da quantidade de P absorvida na MS total produzida na parte aérea das plantas.

Por outro lado, considerando apenas o efeito principal das diferentes saturações por Al^{3+} do solo no acúmulo de P nas cultivares de arroz brasileiras e colombianas verificou-se que o modelo que melhor se ajustou para explicar as variações ocorridas foi o polinomial de segundo grau, indicando que os cultivares IAPAR-9, IAPAR-177, FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-68, continuaram absorvendo e acumulando P na MSPA a valores de saturação por Al^{3+} acima de 40% (Tabela 4.6), contrastando com o que foi observado com a linhagem CNA-8521 (Sensível ao Al^{3+}), que registrou a menor saturação por Al^{3+} com valor de $m=26,3\%$.

Esses resultados corroboram com outros autores que demonstraram ocorrer reduções nos acúmulos de P na MSPA das plantas de arroz com o aumento dos níveis de alumínio (FREITAS; FERNANDES; MAIA, 2015; SILVA et al., 2011 e SILVA et al., 2007).

Tabela 4.6. Equações de regressão polinomial para acúmulo de fósforo ($kg\ ha^{-1}$) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Acúmulo de fósforo		
	Regressão ⁽¹⁾	R ²	PM ⁽²⁾
CNA-8521	AcP=11,19 + 0,1370m - 0,00260m ²	0,99**	26,34
FEDEARROZ-67	AcP=13,04 + 0,1101m - 0,00156m ²	0,98*	35,54
FEDEARROZ-2000	AcP=11,60 + 0,1240m - 0,00171m ²	0,93**	36,25
CNA-4164	AcP=10,67 + 0,1109m - 0,00146m ²	0,91**	37,97
FEDEARROZ-174	AcP= 9,47 + 0,0907m - 0,00113m ²	0,98*	40,13
FEDEARROZ-68	AcP= 7,89 + 0,0873m - 0,00107m ²	0,98**	40,79
IAPAR-177	AcP=10,61+ 0,0947m - 0,00110m ²	0,96**	43,04
IAPAR-9	AcP=11,57+ 0,0803m - 0,0009m ²	0,70**	44,61

C.V. (%)= 17,21

⁽¹⁾ m= saturação por Al^{3+} , ⁽²⁾ PM= ponto máximo de saturação por Al^{3+} , **e* e significativo a 1%, 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Para os teores e acúmulos de K^+ na parte aérea, verificou-se que houve efeito significativo para interação entre os fatores cultivar e saturação por Al^{3+} (C^*m), indicando que as diferenças no comportamento dos genótipos de arroz

brasileiros e colombianos varia tanto entre os cultivares mas depende das variações dos valores da saturação por alumínio do solo (Tabela 4.2).

Os cultivares de arroz avaliados apresentaram comportamento variáveis dependendo do nível de saturação por Al^{3+} considerado. De maneira geral os cultivares brasileiros apresentaram os maiores teores de K^+ na MSPA. Os cultivares de origem colombiana registram os menores teores (Tabela 4.7), na máxima saturação por Al^{3+} .

Tabela 4.7- Médias gerais e equações de regressão para teores de potássio (K^+) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Teor de potássio					
CULTIVARES	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----g kg ⁻¹ -----				
IAPAR-177	23,1 A ⁽¹⁾	23,4 A	23,3 A	23,1 A	22,2 A
IAPAR-9	22,8 A	22,9 A	22,8 A	22,9 A	21,7 A
CNA-4164	20,7 B	20,5 B	20,2 B	19,6 B	19,8 B
CNA-8521	21,3 B	20,9 B	20,5 B	19,6 B	19,2 B
FEDEARROZ-67	19,1 C	18,7 C	18,4 C	18,3 C	17,9 C
FEDEARROZ-2000	17,3 D	17,4 D	16,9 D	16,6 D	16,4 D
FEDEARROZ-174	16,8 D	16,6 D	16,5 D	16,2 D	15,9 DE
FEDEARROZ-68	16,3 D	16,6 D	16,8 D	16,1 D	15,2 E
	C.V.(%)= 18,08			DMS=1,221	
Equações de regressão⁽²⁾					
	----- g kg ⁻¹ -----			R ²	PM ⁽³⁾
IAPAR-177	Teor K=23,11+0,0240m - 0,000413m ²			0,97**	29,05
IAPAR-9	Teor K=22,78+0,0232m - 0,000408m ²			0,83**	28,43
CNA-4164	Teor K=20,737-0,0126m			0,86*	----
CNA-8521	Teor K=21,468-0,0266m			0,97*	----
FEDEARROZ-67	Teor K=19,109-0,0135m			0,97*	----
FEDEARROZ-2000	Teor K=17,445-0,0118m			0,9*	----
FEDEARROZ-174	Teor K=16,887-0,0104m			0,96*	----
FEDEARROZ-68	Teor K=16,28+0,0357m-0,000586m ²			0,98**	30,46

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

⁽²⁾ m=saturação por Al^{3+} ; ⁽³⁾ PM, ponto máximo de saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Assim, os cultivares IAPAR-177 e IAPAR-9, tanto ausência (m=0%)

como nos diferentes valores de saturação por Al^{3+} ($m=83\%$) apresentaram os maiores teores de K^+ na MSPA, diferindo significativamente dos demais materiais avaliados. Os cultivares FEDEARROZ-174 e FEDEARROZ-68, foram os que apresentaram os menores teores de K^+ na parte aérea com 15,95 e 15,22 g kg^{-1} (Tabela 4.7). A redução dos teores de K^+ na MSPA com o aumento dos níveis de Al^{3+} , provavelmente está associada à competição entre os cátions Al^{3+} e K^+ por sítios de absorção nos transportadores (canais de influxo) de cátions monovalentes e divalentes para o interior das células (KOCHIAN, 1995), reduzindo a sua translocação para a parte aérea das plantas (SIVAGURU; PALIWAL, 1993) ou reduzindo o suprimento de energia para os sistemas de transporte (KOCHIAN, 1995; FAGERIA, 1985; MENDONÇA 2003; FREITAS et al. 2006)

Fazendo o desdobramento das interações para avaliar os efeitos da saturação por Al^{3+} dentro de cultivares para o teor de K^+ na MSPA, observa-se que as respostas foram para o modelo quadrático para os cultivares IAPAR-9, IAPAR-177 e FEDEARROZ-68, e modelo linear decrescente para os cultivares FEDEARROZ-174, FEDEARROZ-67, FEDEARROZ-2000 e as linhagens CNA-4164 e CNA-8521 (Tabela 4.7). Estes dados corroboram-se os resultados apresentados por Macedo, Kinet e Jan (1997), Vicente Pereyra Rossiello e Pereira (1998), Veloso et al. (2000), Vasconcelos, Pereyra Rossiello e Jacobo Neto (2002), Carvalho (2003) e Silva et al. (2011).

Para o acúmulo de K^+ (Tabela 4.8), o cultivar FEDEARROZ-67 registrou os maiores valores, tanto na ausência como na presença de Al^{3+} . Na máxima saturação por Al^{3+} ($m=83\%$) a linhagem CNA-8521 (sensível ao Al^{3+}) apresentou o menor valor de acúmulo de K^+ . Assim entre os cultivares brasileiros e colombianos, em quanto ao acúmulo de K^+ na MSPA, nenhum genotipo mostrou superioridade na absorção deste cátion frente a linhagem CNA-4164 (tolerante ao Al^{3+}) (Tabela 4.8).

Em função das saturações por Al^{3+} , as alterações dos conteúdos de K^+ da MSPA ajustaram-se ao modelo quadrático para todos os cultivares de arroz avaliados, permitindo destacar o cultivar IAPAR-9 de origem brasileira, com o maior acúmulo de K^+ (125 kg ha^{-1}), que ocorreu na saturação por Al^{3+} de 39,31%, indicando ser eficiente na capacidade de extrair K^+ em solo ácidos (Tabela 4.8). Os resultados obtidos estão de acordo com Crusciol et al. (2003) que citam o K^+ e o N como os nutrientes absorvidos em maiores quantidades pela cultura de arroz.

Tabela 4.8- Médias gerais e equações de regressão polinomial para o acúmulo de potássio (K^+) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

CULTIVARES	Acúmulo de potássio				
	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----kg ha ⁻¹ -----				
IAPAR-177	104,4 AB ⁽¹⁾	115,5 AB	121,0 AB	115,8 A	94,9 A
IAPAR-9	102,5 AB	110,3 AB	115,0 AB	118,3 A	93,7 A
CNA-4164	98,3 AB	110,0 AB	109,9 AB	93,2 B	79,9 AB
CNA-8521	102,4 AB	116,0 AB	108,9 AB	79,7 A	36,7 B
FEDEARROZ-67	130,4 A	137,6 A	136,8 A	117,5 A	97,8 A
FEDEARROZ-2000	109,5 AB	121,7 AB	119,0 AB	110,1 A	81,0 A
FEDEARROZ-174	86,0 B	96,6 AB	98,2 AB	88,4 B	72,8 AB
FEDEARROZ-68	74,0 B	85,9 B	87,2 B	79,9 B	61,5 AB
	C.V. (%)= 20,11			DMS= 43,86	
Equações de Regressão ⁽²⁾					
	----- kg ha ⁻¹ -----		R ²	PM ⁽³⁾	
IAPAR-177	Ac.K=103,42+0,937m-0,0123m ²		0,97*	38,08	
IAPAR-9	Ac.K =100,51+0,865m-0,0110m ²		0,81*	39,31	
CNA-4164	Ac.K =99,49+0,667m-0,0111m ²		0,94*	30,04	
CNA-8521	Ac.K =102,87+1,082m-0,0227m ²		0,99**	23,83	
FEDEARROZ-67	Ac.K =130,77+0,595m-0,0121m ²		0,98**	24,58	
FEDEARROZ-2000	Ac.K =109,31+0,901m-0,0148m ²		0,99**	30,43	
FEDEARROZ-174	Ac.K =86,19+0,718m-0,0106m ²		0,98**	33,86	
FEDEARROZ-68	Ac.K =74,00+0,807m-0,0115m ²		0,99*	35,08	

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

⁽²⁾ m=saturação por Al^{3+} ; ⁽³⁾ PM, ponto máximo de saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Na parte aérea os teores e acúmulos de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram influenciados pela interação (C*m) (Tabela 4.2). Os teores e acúmulos de Ca^{2+} e Mg^{2+} na MSPA de todos os cultivares de arroz avaliados, decresceram com o aumento na saturação de Al^{3+} no solo (Tabela 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12). O Al^{3+} interfere negativamente nas bases na solução do solo, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , diminuindo a absorção destes nutrientes pelas plantas. Resultados que corroboram com Freitas et al. (2006); que observaram reduções na absorção de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ em plantas de arroz sob toxidez por Al^{3+} .

Deve-se destacar que tanto na ausência como na presença de Al^{3+} , os cultivares de arroz brasileiros apresentaram os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e os menores valores registrados foram para os cultivares colombianos (Tabela 4.9 e 4.10). Howeler e Cadavid (1976) observaram que as plantas mais tolerantes ao Al^{3+} apresentavam teores mais elevados de P, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Entretanto, Furlani e Furlani (1991), destacam que os maiores teores de nutrientes observados nas plantas tolerantes ao Al^{3+} pode ser devido ao efeito indireto do maior aprofundamento e crescimento das raízes, explorando maior volume de solo.

Para (KOCHIAN, 1995) as diferenças genotípicas entre cultivares quanto a sensibilidade do sistema de transporte e absorção de Ca^{2+} na presença de Al^{3+} estão associadas ao funcionamento de canais de absorção de Ca^{2+} e pode ser um dos mecanismos responsáveis pela tolerância das plantas de arroz ao Al^{3+} do solo.

Na ausência de Al^{3+} no solo ($m=0\%$), o cultivar IAPAR-177 apresentou o maior teor de Ca^{2+} ($7,575 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto o menor valor foi registrado no cultivar FEDEARROZ-68 com ($5,701 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 4.9). Na máxima saturação por Al^{3+} ($m=83\%$), o maior teor foi para o cultivar IAPAR-9 ($5,973 \text{ g kg}^{-1}$) e o menor foi registrado para o cultivar FEDEARROZ-67 ($4,313 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 4.9).

De acordo com Huang (1995) e Jones et al., (1998), o Al^{3+} pode inibir a absorção de Ca^{2+} bloqueando os canais de Ca^{2+} na membrana plasmática. As reduções dos teores de Ca^{2+} na MSPA das plantas de arroz, observadas nestes estudo, podem ser atribuídas à interferência do Al^{3+} na atividade da enzima ATPase, uma vez que este elemento apresenta grande afinidade pela calmodulina (2,5 a 10 vezes maior que a do cálcio). A calmodulina é classificada como proteína transportadora que estimula a ATPase e exerce papel importante na manutenção do potencial da membrana (SIEGEL, HAUG, 1983). A ligação do Al^{3+} à molécula da calmodulina diminui a capacidade reguladora da membrana citoplasmática, reduzindo a absorção do Ca^{+2} .

Para o teor de Ca^{+2} foi observado na análise de regressão as maiores reduções para a linhagem CNA-8521 (Sensível ao Al^{3+}), na ordem de $0,0321 \text{ g kg}^{-1}$ por cada 1% de saturação de Al^{3+} no solo (Tabela 4.8), a menor redução foi observada no cultivar FEDEARROZ-68 com valor de $0,0126 \text{ g kg}^{-1}$.

Tabela 4.9 - Médias gerais e equações de regressão linear para o teor de cálcio (Ca^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

CULTIVARES	Teor de cálcio				
	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----g kg ⁻¹ -----				
IAPAR-177	7,57 A ⁽¹⁾	7,61 A	7,14 A	6,37 AB	5,87 AB
IAPAR-9	7,11 AB	7,21 AB	6,94 AB	6,52 A	5,97 A
CNA-4164	6,81 ABC	6,53 ABC	6,70 ABC	5,43 ABC	4,90 ABC
CNA-8521	7,21 ABC	6,73 ABC	5,90 ABC	5,02 BC	4,69 ABC
FEDEARROZ-67	6,01 BC	5,73 BC	5,41 C	4,62 C	4,31 C
FEDEARROZ-2000	5,93 BC	5,51 C	5,32 C	4,81 C	4,43 BC
FEDEARROZ-174	5,81 BC	5,67 BC	5,56 BC	4,92 BC	4,51 ABC
FEDEARROZ-68	5,70 C	5,66 BC	5,60 BC	5,21 ABC	4,60 ABC
	C.V. (%)= 16,34			DMS= 1,501	
Equações de regressão ⁽²⁾					
	----- g kg ⁻¹ -----				R ²
IAPAR-177	Teor Ca=7,848-0,0222m				0,91**
IAPAR-9	Teor Ca=7,346-0,0143m				0,84*
CNA-4164	Teor Ca=7,060-0,0235m				0,82*
CNA-8521	Teor Ca=7,276-0,0321m				0,97**
FEDEARROZ-67	Teor Ca=6,126-0,0217m				0,95**
FEDEARROZ-2000	Teor Ca=5,950-0,0178m				0,93**
FEDEARROZ-174	Teor Ca=5,969-0,0160m				0,96**
FEDEARROZ-68	Teor Ca=5,887-0,0126m				0,86*

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

⁽²⁾ m= saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

De modo geral, observando as equações de regressão linear para os teores de Ca^{+2} na massa seca de parte aérea (Tabela 4.9), os cultivares de arroz colombianos apresentaram as menores declividades em função da saturação de Al^{3+} , destacando sua absorção em condições de maior acidez do solo.

De forma semelhante ao observado para o Ca^{2+} , os teores de Mg^{2+} na MSPA de cultivares de arroz brasileiras e colombianas, reduziram em função dos níveis de saturação por Al^{3+} do solo, porém com comportamentos distintos entre os cultivares. No caso do Mg^{2+} as diferenças entre cultivares quanto as reduções nos teores de Mg^{2+} da MSPA ocorream de forma mais acentuada a valores de saturação por Al^{3+} iguais ou superiores a 43% (Tabela 4.10). Essas reduções podem ser

atribuídas ao efeito do Al^{3+} que segundo Hung et al. (1992) bloqueia os canais iônicos das membranas das células radiculares, dificultando a absorção do Mg^{2+} . Pode ter corrido também o bloqueio dos sítios de ligações desse nutriente com as proteínas transportadoras (RENGEL; ROBINSON, 1989). O raio iônico do Al^{3+} é bastante similar com o do íon Mg^{2+} , podendo cruzar a membrana permeando lentamente um canal de cátions bivalentes que normalmente funciona na absorção de Mg^{2+} , diminuindo dessa maneira a absorção de magnésio pelas plantas (HUNG et al., 1992).

Tabela 4.10 - Médias gerais e equações de regressão para teor de magnésio (Mg^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) das plantas de arroz de cultivares brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Teor de magnésio					
CULTIVARES	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----g kg ⁻¹ -----				
IAPAR-177	4,30 A ⁽¹⁾	4,38 A	4,08 AB	3,76 AB	3,24 AB
IAPAR-9	4,51 A	4,59 A	4,39 A	4,07 A	3,67 A
CNA-4164	4,08 A	4,19 A	3,68 AB	3,42 AB	2,91 AB
CNA-8521	4,31 A	3,95 A	3,44 B	3,22 AB	2,87 AB
FEDEARROZ-67	3,92 A	3,97 A	3,42 B	2,93 B	2,24 B
FEDEARROZ-2000	3,82 A	3,87 A	3,32 B	2,88 B	2,41 B
FEDEARROZ-174	3,75 A	3,80 A	3,61 AB	3,04 B	2,68 B
FEDEARROZ-68	3,70 A	3,76 A	3,41 B	3,21 AB	2,76 B
	C.V. (%)= 15,46			DMS= 0,910	
Equações de regressão ⁽²⁾					
	-----g kg ⁻¹ -----				R ²
IAPAR-177	Teor Mg=4,505-0,0131m				0,86*
IAPAR-9	Teor Mg=4,689-0,0101m				0,83*
CNA-4164	Teor Mg=4,281-0,0150m				0,89*
CNA-8521	Teor Mg=4,232-0,0167m				0,98**
FEDEARROZ-67	Teor Mg=4,178-0,0210m				0,91**
FEDEARROZ-2000	Teor Mg=4,033-0,0184m				0,92**
FEDEARROZ-174	Teor Mg=3,958-0,0138m				0,85*
FEDEARROZ-68	Teor Mg=3,863-0,0117m				0,89*

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

⁽²⁾ m, saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

A maior redução nos teores de Mg^{2+} da MSPA foi observada no cultivar FEDEARROZ-67 com valor de $0,021 \text{ g kg}^{-1}$ para cada 1% de incremento na saturação por Al^{3+} no solo (Tabela 4.10). Nesse sentido, o menor decréscimo linear ($0,0101 \text{ g kg}^{-1}$) foi registrado para o cultivar IAPAR-9. Esses resultados corroboram com as afirmações de FOY (1974), segundo o qual o excesso de Al^{3+} , reduz a absorção, transporte e uso de nutrientes pelas plantas. Salvador, Moreira e Malavolta (2000) e Freitas et al. (2006), também constataram que doses de Al^{3+} reduziram a absorção e o transporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} e outros nutrientes (P, S, Fe e Mn) na parte aérea das plantas de arroz.

O acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} na MSPA dos cultivares de arroz brasileiros e colombianos evidenciaram o efeito negativo da presença de Al^{3+} no solo (Tabelas 4.11 e 4.12). Entretanto, baixos teores de Al^{3+} no solo ($m=21\%$) favoreceu principalmente o acúmulo de cálcio (Tabela 4.10), provavelmente porque esse nutriente normalmente é absorvido em maiores quantidades que para o Mg^{2+} . No entanto, para níveis intermediários de saturação por Al^{3+} (43 e 62%), não foram observadas quaisquer diferenças significativas entre os cultivares de arroz avaliados, quanto à absorção e acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} na MSPA. Esse fato indica certa similaridade de comportamento entre os materiais testados.

De igual forma, para Crusciol et al., (2012), o índice de saturação por bases de 40% propiciou valores mais expressivos, independentemente do genótipo, evidenciando valores próximos de $V=39,6\%$ do presente trabalho e aos recomendados por Cantarella e Furlani (1997), com $V=50\%$. Para Soratto, Crusciol e Mello (2010), o uso de cultivares mais tolerantes à acidez do solo proporciona a obtenção de maiores produtividades das culturas no início do sistema de semeadura direta, quando ainda não houve efetiva correção do solo pela aplicação superficial de corretivos.

Considerando os efeitos da saturação por Al^{3+} no solo, foi possível observar que as alterações nos conteúdos de Ca^{2+} e Mg^{2+} na MSPA se ajustaram significativamente a funções polinomiais de segunda ordem, independentemente do cultivar considerado (Tabelas 4.11 e 4.12), concordando com o que foi observado por Fageria, Wright e Baligar (1988), Vicente, Pereyra Rossiello, e Pereira (1998a) e Vasconcelos, Pereyra Rossiello e Jacobo Neto (2002) que também trabalharam com diferentes cultivares de arroz.

Tabela 4.11- Médias gerais e equações de regressão para o acúmulo de cálcio (Ca^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Acúmulo de Cálcio				
	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----kg ha ⁻¹ -----				
IAPAR-177	34,5 AB	35,2 A	34,4 A	34,1 A	30,3 A
IAPAR-9	32,4 AB	37,8 A	37,1 A	31,7 A	25,5 A
CNA-4164	33,0 AB	35,1 A	37,5 A	25,8 A	20,1 AB
CNA-8521	34,8 AB	37,2 A	30,4 A	21,0 A	9,3 B
FEDEARROZ-67	40,5 A ⁽¹⁾	42,6 A	40,8 A	31,5 A	23,2 AB
FEDEARROZ-2000	37,9 AB	38,8 A	36,9 A	32,5 A	22,3 AB
FEDEARROZ-174	30,6 AB	32,9 A	33,1 A	25,8 A	20,6 AB
FEDEARROZ-68	25,6 B	29,0 A	29,1 A	25,9 A	18,6 AB
	C.V.(%)= 21,69		DMS= 14,54		
Equações de regressão ⁽²⁾					
	----- kg ha ⁻¹ -----		R ²	PM ⁽³⁾	
IAPAR-177	Ac Ca=34,81+0,2141m-0,00398m ²		0,98**	26,90	
IAPAR-9	Ac Ca=32,23+0,227m-0,00350m ²		0,94**	32,42	
CNA-4164	Ac Ca=33,03+0,2459m-0,00497m ²		0,88*	24,73	
CNA-8521	Ac Ca=35,63+0,1124m-0,00527m ²		0,98**	10,66	
FEDEARROZ-67	Ac Ca=40,81+0,1778m-0,00480m ²		0,97**	18,51	
FEDEARROZ-2000	Ac Ca=37,66+0,1664m-0,00418m ²		0,99**	19,91	
FEDEARROZ-174	Ac Ca=30,80+0,1824m-0,00375m ²		0,94**	24,32	
FEDEARROZ-68	Ac Ca=25,25+0,2598m-0,00412*m ²		0,99**	31,52	

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

⁽²⁾ m, saturação por Al^{3+} ; ⁽³⁾ PM, ponto máximo de saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor.

Para o acúmulo de Ca^{2+} , o cultivar IAPAR-9 apresentou o maior ponto de máximo para uma saturação por Al^{3+} de (m=32,4%), com acúmulo estimado em 37,5 kg ha⁻¹ (Tabela 4.11). A linhagem CNA-8521 (Sensível ao Al^{3+}) apresentou o menor ponto de saturação (m=10,6%), e acúmulo de Ca^{2+} estimado em 36,7 kg ha⁻¹, quantidade que não difere muito do que foi observado para o cultivar IAPAR-9. De acordo com as indicações de Mendonça (2003), pode-se afirmar que os genótipos de arroz com maior tolerância ao Al^{3+} , são menos exigentes em teores tracaveis de Ca^{2+} no solo. O que deve ser destacado nesse caso é o fato de

que na implantação de lavouras utilizando cultivares mais tolerantes ao Al^{3+} do solo, minimiza-se ou elimina totalmente os gastos com a realização da calagem, visando adequar as propriedades químicas do solo às necessidades da plantas de arroz.

Quando se avalia o Mg^{2+} pode-se observar que o cultivar IAPAR-9 apresentou o maior valor de saturação por Al^{3+} ($m=30,7\%$), permitindo estimar que a quantidade acumulada de Mg^{2+} foi de $22,7 \text{ kg ha}^{-1}$; por outro lado, o menor valor para o ponto máximo ($m=10,4\%$) foi obtido com a linhagem CNA-8521 (sensível ao Al^{3+}) correspondente ao acúmulo de $21,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg^{2+} na MSPA (Tabela 4.12).

Tabela 4.12. Médias gerais e equações de regressão polinomial para o acúmulo de magnésio (Mg^{2+}) na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Acúmulo de magnésio					
Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
	-----kg ha ⁻¹ -----				
IAPAR-177	19,3 AB ⁽¹⁾	21,7 AB	21,5 A	18,6 A	13,9 AB
IAPAR-9	20,5 AB	22,4 AB	21,8 A	21,1 A	15,8 A
CNA-4164	19,7 AB	22,4 AB	20,0 A	16,3 A	11,8 AB
CNA-8521	20,8 AB	21,2 AB	17,7 A	13,4 A	5,7 B
FEDEARROZ-67	27,2 A	29,2 A	24,7 A	18,9 A	12,1 AB
FEDEARROZ-2000	24,4 AB	27,1 AB	23,3 A	19,3 A	12,0 AB
FEDEARROZ-174	19,6 AB	22,0 AB	21,5 A	16,1 A	12,2 AB
FEDEARROZ-68	16,7 B	19,4 B	17,7 A	15,7 A	11,2 AB
	C.V.(%)= 15,45			DMS= 8,395	
Equações de regressão ⁽²⁾					
	----- kg ha ⁻¹ -----			R ²	PM ⁽³⁾
IAPAR-177	Ac Mg=19,39+0,1691m-0,00284m ²			0,99**	29,77
IAPAR-9	Ac Mg=20,46+0,1470m-0,00239m ²			0,96*	30,75
CNA-4164	Ac Mg=20,19+0,1170m-0,00268m ²			0,97**	21,83
CNA-8521	Ac Mg=20,91+0,0612m-0,00294m ²			0,99**	10,41
FEDEARROZ-67	Ac Mg=27,83+0,0738m-0,00324m ²			0,98**	11,38
FEDEARROZ-2000	Ac Mg=24,91+0,1270m-0,00343m ²			0,98**	18,51
FEDEARROZ-174	Ac Mg=19,99+0,1417m-0,00291m ²			0,95*	24,34
FEDEARROZ-68	Ac Mg=16,98+0,1370m-0,00253m ²			0,98**	27,08

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

⁽²⁾ m, saturação por Al^{3+} ; ⁽³⁾ PM, ponto máximo de saturação por Al^{3+} ; ** e * significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Entre os cultivares colombianos o FEDEARROZ-67 foi o que apresentou o menor ponto de máximo acúmulo de Mg^{2+} na MSPA ($m=11,3\%$), equivalente a $28,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg^{2+} . Esses resultados indicam que a presença do Al^{3+} no solo, influencia negativa e indistintamente a absorção e acúmulo de Mg^{2+} na MSPA de todos os cultivares e linhagens de arroz, independentemente da origem dos programas de melhoramento que os desenvolveram.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com resultados apresentados por outros pesquisadores como Duarte et al., (1999); Freitas et al., (2006); Silva, (2007); Silva et al., (2011) e Crusciol et al., (2012) que observaram ocorrer reduções no acúmulo de Mg^{2+} de plantas de arroz com o aumento dos níveis de alumínio. Já Sivaguru & Paliwal (1993), indicam que além da capacidade de manter teores elevados de certos íons, cultivares de arroz tolerantes ao alumínio apresentam maior eficiência na absorção e utilização desses elementos. Os resultados obtidos nesse estudo está de acordo com Mendonça et al. (2003), que avaliaram o crescimento e desenvolvimento de plantas de arroz em solução nutritiva e observaram que o cultivar (ou cultivares) tolerante a toxidez por Al^{3+} apresentaram maior eficiência na utilização do Ca^{2+} e do Mg^{2+} , além do P e K^+ , em comparação com o cultivar sensível.

Os resultados para a avaliação das correlações de Pearson entre as variáveis avaliadas para os cultivares de arroz brasileiros e colombianos encontram-se apresentados na tabela 4.13.

A produtividade de grãos dos cultivares e linhagens do arroz (Tabela 4.14) correlacionou positiva e significativamente com o conteúdo de todos os nutrientes avaliados (Tabela 4.13). Isto indica que essa variável pode contribuir para o processo de seleção de genótipos de arroz cultivados em áreas de solos ácidos com diferentes saturações por alumínio. Para os cultivares/linhagens brasileiros as maiores correlações foram obtidas para os nutrientes K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P e N enquanto que para os cultivares colombianos a ordem decrescente de correlação foi: Mg^{2+} , Ca^{2+} , N, K^+ e P. De acordo com Freitas et al, (2006), os cultivares de arroz que apresentam maiores correlações entre produção e absorção de P e Ca^{2+} em diferentes níveis de alumínio, podem ser considerados como genótipos superiores quanto a tolerância ao Al^{3+} do solo.

Tabela 4.13 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a produtividade de grãos e o acúmulo individual de nutrientes na massa seca de parte aérea (MSPA) de cultivares de arroz brasileiros e colombianos cultivados em solo com diferentes saturações por alumínio. San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Nutrientes acumulados na MSPA				
	N	P	K	Ca	Mg
Brasileiros	+0,459*	+0,563*	+0,628*	+0,627*	+0,602*
Colombianos	+0,607*	+0,463*	+0,482*	+0,663*	+0,734*

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Tabela 4.14 - Valores médios de produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em função da saturação por Al^{3+} . San Luis de Palenque, Colômbia, safras 2014 e 2015.

Cultivares	Saturação por Al^{3+} (%)				
	0	21	43	62	83
IAPAR-177	3,072 C	4,157 B	4,637 A	4,638 B	3,286 A
FEDEARROZ-68	4,135 B*	4,548 B	4,782 A	4,567 B	2,957 A
IAPAR-9	2,800 C	3,435 C	3,718 B	3,819 B	2,911 A
FEDEARROZ-174	4,801 A	5,045 A	5,102 A	5,061 A	2,862 A
FEDEARROZ-2000	4,920 A	5,044 A	5,149 A	4,945 A	2,470 A
FEDEARROZ-67	4,860 A	5,053 A	4,836 A	4,348 B	2,200 B
CNA-4164	2,489 C	2,856 C	2,883 C	2,610 C	1,988 B
CNA-8521	2,914 C	3,118 C	2,849 C	2,229 C	1.123 C

*Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

4.6 CONCLUSÕES

A saturação do solo por alumínio reduz significativamente os teores e acúmulos de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz.

Cultivados em solos com diferentes saturações por Al^{3+} , os cultivares de arroz brasileiros apresentaram maiores teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, na matéria seca da parte aérea, do que cultivares colombianos.

A produtividade de linhagens e cultivares de arroz brasileiros e colombianos cultivado em solo com diferentes saturações por Al^{3+} , correlaciona positiva e significativamente com o conteúdo dos nutrientes de potássio, cálcio, magnésio, fósforo e nitrogênio na matéria seca da parte aérea.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Os cultivares e linhagens de arroz de sequeiro de origem brasileira e colombiana diferem significativamente quanto aos efeitos do alumínio trocável do solo nas suas características biométricas e parâmetros fitotécnicos, sendo o índice de tolerância (IT) e o índice de colheita (IC) variáveis adequadas para fazer a distinção entre cultivares de arroz sensíveis e tolerantes ao alumínio do solo.

Os cultivares de arroz sob estresse por Al^{3+} em condições de campo a produtividade de grãos, apresentaram a seguinte ordem decrescente de tolerância ao Al^{3+} ; IAPAR-9>IAPAR-177>FEDEARROZ-68>FEDEARROZ-174>CNA-4164>FEDEARROZ-2000>FEDEARROZ-67>CNA-8521.

Sob baixas saturações por Al^{3+} , os cultivares de arroz colombianos apresentaram as maiores produtividades de grãos que os genótipos de origem brasileiros.

A saturação por Al^{3+} no solo promoveu mudanças na nutrição dos cultivares e linhagens de arroz brasileiros e colombianos em condições de campo reduzindo significativamente os teores e acúmulos de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na matéria seca da parte aérea das plantas de arroz.

Os cultivares de arroz brasileiros apresentaram maiores teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, na matéria seca da parte aérea, do que os cultivares colombianos.

A produtividade de grãos de linhagens e cultivares de arroz brasileiros e colombianos cultivados em solo com diferentes saturações por Al^{3+} , correlaciona-se positiva e significativamente com os conteúdos de potássio, cálcio, magnésio, fósforo e nitrogênio na matéria seca da parte aérea.

REFERÊNCIAS

AHN, S.; SIVAGURU, M.; OSAWA, H.; CHUNG, G. C.; MATSUMOTO, H. Aluminum inhibits the H⁺-ATPase activity by permanently altering the plasma membrane surface potentials in squash roots. *Plant Physiology*, Rockville, v. 126, n. 2, p. 1381-1390, 2001.

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

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

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

BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. Experimentação agrícola. Jaboticabal: FUNESP, 1989.

BASSINELLO, A.I. *Interações de genótipos x ambientes em Cana-de-açúcar (Saccharum spp.)* 1984. 110p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1984.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Humico em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p.537-544,2003.

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.

BIANCHI-HALL, C.M.; CARTER, T.E Jr., BAILEY, M.A.; MIAN, M.A.R.; RUFTY, T.W.; ASHLEY, D.A.; BOERMA, H.R.; ARELLANO, C.; HUSSEY, R.S.; PARROT, W.A. Aluminum tolerance associated with quantitative trait loci derived from soybean PI 416937 in hydroponics. *Crop Science*, Madison, v.40, p. 538–545, 2000.

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).

BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J. La fertilizacion de los suelos tropicales para el cultivo de la soya. En: EMBRAPA. *El cultivo de la soya en los tropicos. Mejoramiento y produccion*. Roma: Embrapa; CNPSo, 1995. p. 175-200. (Colección FAO, Produccion y Proteccion Vegetal No. 27).

BOURLAUG, N. E.; DOSWELL, C. R. Feeding a human population that increasingly crowds a fragile plant. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., 1994, Acapulco. *Keynote address, Suppl.*, p. 1-15.

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

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 47, n. 7, p. 1007-1014. 2012.

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.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.28, p.125-136, 2004.

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

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.

CANTARELLA, H.; FURLANI, P. R. Arroz de sequeiro. In: RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C (Ed.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: IAC, 1997. p. 48-49. (Boletim Técnico 100).

CARGNIN, A.; SOUZA, M. A.; PIMENTEL, A. J. B.; FOGAÇA, C. M. Diversidade genética em cultivares de arroz e correlações entre caracteres agrônômicos. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 57, n.1, p. 53-59, jan/fev, 2010.

CARVALHO, A.M.; FAGERIA, N.K.; OLIVEIRA, I.P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 19, p. 61-67, 2003.

CARVALHO, J. R. P.; FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, p. 61-67, 1995.

CARVER, B. F.; OWNBY, J. D. Acid soil tolerance in wheat. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 54, p. 117-173, 1995.

CLARK, R. B.; PIER, P. A.; KNUDSEN, D.; MARANVILLE J. W. 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.

COCHRANE T. T.; SÁNCHEZ; L. F.; PORRAS J. A.; DE AZEVEDO L. G.; GARVER C. L. *Land in Tropical América*. Cali, Colômbia: CIAT, Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1985. v.1.

COCHRANE T. T.; SÁNCHEZ L. F. Clima, paisaje y suelos de las sabanas tropicales de Suramérica. *Inverciências*, Caracas, v. 6, p. 239-243, 1981.

CONTRERAS, M. S. Tolerância de cultivares de arroz colombianos ao alumínio em solução nutritiva. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C.; MANCUZO, M. A. C.; GARCIA, R. A.; CASTRO, G. S. A. Crescimento radicular e aéreo de cultivares de arroz de terras altas em função da calagem. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 2, p. 256-263, 2012.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*, Rockville, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Keys to soil Taxonomy*. 11. ed. United States: USDA, 2010

DEVINE, T.E.; FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; HANSON, C.H.; CAMPBELL, T.A.; MCMURTREY, J.E.; SCHWARTZ, J.W. Development of alfalfa strains with differential tolerance to aluminum toxicity. *Plant and Soil*, The Hague, v.44, p. 73-79, 1976.

DOBERMANN, A.; FAIRHURST, T. *Rice nutrient disorders e nutrient management*. Handbook series. Potash e Phosphate Institute (PPI), Potash e Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute, 2000.

DUARTE, A. P.; VOLTAN, R. B. Q; FURLANI, P. R.; KANTHACK, R. A. D. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro à calagem. *Bragantia*, Campinas, v. 58, n. 2, p. 353-361, 1999.

EVANS, C. E.; KAMPRAHT, E. J. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 34, p. 893-896, 1970.

FAGERIA, N. K. *Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz*. Goiânia: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, 1984.

FAGERIA, N. K. Effect of lime on upland rice, common bean, corn, and soybean Production in Cerrado soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, p.1419-1424, 2001.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2303-2307, 2000.

FAGERIA, N. K. Tolerância diferencial de cultivares de arroz ao alumínio em solução nutritiva. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.17, n.1, p.1-9, jan. 1982.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. Cameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 98, p. 345-399, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: MARANVILLE, J. W.; BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; YOHE, J. M. (Ed.). *Adaptation of plants to soil stress*. Lincoln: University of Nebraska/Intsomil-Usaid, 1994. p. 142-159.

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

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; COELHO, A. M. Yield and yield components of upland rice as influenced by nitrogen sources. *Journal of Plant Nutrition*, v. 34, p. 361-370, 2010.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. *Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. (Documentos 92).

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, 29:2675-2682. 1998.

FAGERIA, N. K.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C. Rice cultivar response to aluminum in nutrient solution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 19, n. 7/12, p. 1133-1142, 1988.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 14, n. 2, p. 141-147, fev. 1979.

FAQUIN, V. *Nutrição mineral de plantas*. Lavras: UFLA/FAEPE, 1994.

FERNANDES, M. S.; ROSSIELLO, O. P. R. Mineral nitrogen in plant physiology and plant nutrition. *Critical Reviews in Plant Sciences*, Philadelphia, v. 14, n. 2, p. 111-148, 1995.

FERREIRA, R. DE P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. *Toxidez de alumínio em culturas anuais*. São Carlos, SP: EMBRAPA Pecuária Sudeste, 2006. (Documentos, 63).

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

FERREIRA, R. P.; SALGADO, L. T.; JORGE, H. D. Tolerância de cultivares de arroz ao alumínio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 21, n. 12, p. 1257-1260, 1986.

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

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. *Manual da cultura do arroz*. Jaboticabal: FUNEP, 2006.

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

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

FOY, C. D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 19, p. 959-987, 1988.

FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root-growth. *Advances in Soil Science*, New York, v. 19, p. 97-149. 1992.

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

FOY, C. D. Tolerance of barley cultivars to an acid aluminum toxic subsoil related to mineral element concentrations in their shoots. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 19, p. 1361-1380, 1996a.

FOY, C. D. Tolerance of durum wheat lines to an acid aluminum-toxic subsoil. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 19, p. 1381-1394, 1996b.

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

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

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

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

FREITAS, L. B.; FERNANDES, D. M.; MAIA, S. Cristina Mendonça. Silício na nutrição mineral e acúmulo de alumínio em plantas de arroz de terras altas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 440-448, Dec. 2015 .

- FREITAS, F. A.; KOPP, M. M.; SOUSA, R. O.; ZIMMER, P. D.; CARVALHO, F. I. F.; OLIVEIRA, A. C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 72-79, 2006.
- FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C. Tolerância a alumínio e deficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. *Bragantia*, Campinas, v. 50, p. 331-340, 1991.
- FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminium tolerance in nutrient solutions. *Agronomy Journal*, Madison, v. 73, p. 587-594, 1981.
- FURLANI, P. R.; HANNA, L. G. Avaliação da tolerância de plantas de arroz e milho ao alumínio em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 8, n. 2, p. 205-208, 1984.
- GUIMARÃES, C. M.; NEVES, C. F.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, J. P. Resistência do arroz de terras altas ao alumínio. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 855-860, 2006.
- HAI, T. VAN; HOUBEN, V.; MBOUTI, C. N.; DUFEY, J. E. Diagnostic précoce de la résistance de cultivars de riz (*Oryza sativa* L.) à la toxicité aluminique. *Agronomie*, Paris, v. 13, p. 853-860, 1993.
- HORST, W. J.; PUSCHEL, A. K.; SCHMOHL, N. Induction of callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminium sensitivity in maize. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 192, p. 23-30, 1997.
- HORTS, W. J.; KLOTZ, F. Screening soybean for aluminum tolerance and adaptation to acid soils. In: EL BASSAM, N. et al. *Genetic aspects of plant mineral nutrition*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 355-360.
- HORTS, W. J.; KLOTZ, F.; SZULKIEWICZ, P. Mechanical impedance increases aluminum tolerance of soybean (*Glycine max*) roots. *Plant and Soil*, The Hague, v. 124, p. 227-231, 1990.
- HOWELER, R. H.; CADAVID, L. F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agronomy Journal*, Madison, v. 68, n. 4, p. 551-555, 1976.
- HUANG, C.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; YANO, M.; NAGAMURA, Y. A bacterial-type ABC transporter is involved in Aluminum tolerance in rice. *The Plant Cell*, Rockville, v. 21, p. 655-667, 2009.
- HUANG, J. W.; PELLET, D. M.; PAPERNIK, L. A.; KOCHIAN, L. V. 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.
- IGAC - INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI" *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 6. ed. Subdirección Agrología. Bogotá: Imprenta Nacional de Colômbia, 2006.

IGAC - INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI". *Subdirección de Agrología. Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Casanare, escala 1.100.000.* Subdirección de Agrología. Bogotá: Imprenta Nacional de Colômbia, 2014.

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

JAN, F. Aluminium effects on growth nutrient net uptake and transport in 3 rice (*Oryza sativa*) cultivars with different sensitivity to aluminium. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 83, n. 3, p. 441-448, 2005.

JAN, F. Effects of a pregrowth period in Al-free nutrient solution on macronutrient composition of two upland rice cultivars with various Al sensitivity. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 88, p. 123-128, 1993.

JAN, F.; PETTERSSON, S. Effects of low aluminium levels on growth and nutrient relations in three rice cultivars with different tolerances to aluminium. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 16, n. 2, p. 359-372, 1993.

JAN, F.; PETTERSSON, S. Varietal diversity of upland rice in sensitivity to aluminium. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 12, n. 9, p. 973-993, 1989.

JOHNSON JUNIOR, J. P.; CARVER, B. F.; BALIGAR, V, C. Expression of aluminum tolerance transferred from atlas 66 to hard winter wheat. *Crop Science*, Madison, v. 37, p. 103-108, 1997.

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

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

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

KHATIWADA, S. P.; SENADHIRA, D.; CARPENA, A. L.; ZEIGLER, S. R.; FERNANDEZ, P. G. Variability and genetics of tolerance for aluminum toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, Heidelberg, v.93, p.738-744, 1996.

KIKUI, S.; SASAKI, T.; MAEKAWA, M.; MIYAO, A.; HIROCHIKA, H.; YAMAMOTO, Y. Physiological and genetic analyses of aluminum tolerance in rice, focusing on root growth during germination. *Journal of Inorganic Biochemistry*, New York, v. 99, p. 1837-1844, 2005.

KIM, B.Y.; BAIER, A.C.; SOMERS, D.J.; GUSTAFSON, J.P. Aluminum tolerance in Triticale, wheat and rye. *Euphytica*, Wageningen, v. 120, p. 329-337, 2001.

KINRAIDE, T. B.; RYAN, P. R.; KOCHIAN, L. V. Interactive effects of Al^{3+} , H^+ , and other cations on root elongation considered in terms of cell surface electrical potencial. *Plant Physiology*, Lancaster, v. 99, n. 4, p. 1461-1468, 1992.

KLEINHEISTERKAMP, I.; HÄBICH, G. Colômbia: Estudiobiológico y técnico. In: VERA, R.R.; SERÉ, C. (Eds.). *Sistemas de Producción Pecuaria Extensiva*: Brasil, Colômbia, Venezuela. Cali, Colômbia: CIAT, 1985. p. 213-278.

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

KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; MAGALHAES, J.V.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanism of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, Palo Alto, v. 55, p.459-493, 2004.

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

KOCHIAN, L.V.; PENCE, N.S.; LETHAM, L. D.; PINEROS, M. A. MAGALHÃES, J. V.; HOEKENGA, O. A.; GARVIN, D. F. Mechanisms of metal resistance in plants: aluminum and heavy metals. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 247, p.109-119, 2002.

KUMAR, V.; LADHA, J.K. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs. *Advances in Agronomy*, v.111, p. 297-396, 2011.

LAFEVER, H. N.; CAMPBELL L. G. inheritance of aluminum tolerance in wheat. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*, Ottawa, v.20, n.3, p. 355-364, 1978.

LINDSAY, W. L.; WALTHALL, P. M. The solubility of aluminum in soils. In: SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. New York. Boca Raton. Lewis, 1995. p. 333-361.

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

LIU, K.; LUAN, S. Internal aluminum block of plant inward K channels. *The Plant Cell*, Rockville, v. 13, p. 1453–1465, 2001.

MA, J., RYAN, P., DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends in Plant Science*, Kidlington, v.6, n. 6, p. 273-278, 2001.

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.

MACEDO, C. E. C.; JAN, V. S. Effect of aluminum stress on mineral nutrition in rice cultivars differing in aluminum sensitivity. *Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 363-369, 2008.

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

MACHADO, J. R. *Desenvolvimento da planta e produtividade de grãos de populações de arroz (Oryza sativa L.) irrigado por inundação em função de épocas de cultivo*. 1994. 237p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

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

MARTINS, C. E. *Práticas agrícolas relacionadas à calagem do solo*. Juiz de Fora: EMBRAPA, 2005. (Comunicado Técnico 47).

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *International review of cytology*, New York, v. 200, p. 1-46, 2000.

MATSUO, N.; MOCHIZUKI, T. Growth and yield of six rice cultivars under three water-saving cultivations. *Plant Production Science*, Tokyo, v. 12, n. 4, p. 514-525, 2009.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; ALVAREZ, R.C.; SILVA, R. H. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por cultivares de arroz de terras altas em resposta à calagem. *Científica*, Jaboticabal, v.32, n.2, p.178-184, 2004.

MENDONÇA, J. R. 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.

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

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

MISTRO, J. C.; CAMARGO, C. E. O.; PETTINELLI-JUNIOR, A. Avaliação de genótipos de trigo, de diferentes origens, em relação à toxicidade de alumínio. *Bragantia*, Campinas, v. 60, n. 3, p. 1-9, 2001.

MISTRY, J. *World savanas: ecology and human use*. New York: Prentice Hall, 2000.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 237-247, 2008.

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

OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Ed.). *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems: NifTAL project*. Honolulu: University of Hawaii, 1989. p. 69-96.

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

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema Plantio Direto. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2. p.393-486.

OLIVEIRA, I. P.; OLIVEIRA, L. C. **Sintomas de deficiência de cálcio e magnésio na planta de nim**. Montes Belos: Faculdade Montes Belos (FMB), 2009.

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

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

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

PAVINATO, P. S.; AGUIAR, A.; CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Boro em arroz de terras altas cultivado em solução nutritiva. *Bragantia*, Campinas, v. 68, n. 3, p.743-751, 2009.

PIÑEROS, M. A.; MAGALHAES, J.V.; ALVES, V.M. C.; KOCHIAN, L.V. The physiology and biophysics of an aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. *Plant Physiology*, Washington, v. 129, n. 3, p. 1194-1206, 2002.

PINHEIRO, B. S. Características morfofisiológicas da planta relacionada à produtividade. In: VIEIRA, N. R. A.; SANTOS, A. B.; SANT'ANA, E. P. (Ed.). *A cultura do arroz no Brasil*. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p. 116-147.

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.

POSCHENRIEDER, C. B.; GUNSÉ, I.; CORRALES, J. BARCELÓ. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *The Science of the total environment*, Amsterdam, v. 400, p. 356-368, 2008.

PRADO, R. M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. *Revista Biociência*, Taubaté, v.9, n.3, p.7-16, jul./set. 2003.

PRASAD, R. Aerobic rice systems. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 111, p.207-236, 2011.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

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

RENGEL, Z.; ROBINSON, D. L. Aluminum effects on growth and micronutrient uptake by annual ryegrass. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, p. 208–215, 1989.

RESENDE, M. D. V. *Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo*. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. (Documentos, 100).

ROSOLEM, C.A.; WERLE, R.; GARCIA, R.A. Nitrogen washing from C3 and C4 cover grasses residues by rain. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1899-1905, 2010.

ROSSIELLO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétricos e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 30, n. 5, p. 633-638, maio, 1995.

ROY, B.; MANDAL, A. B. Towards development of Al-toxicity tolerant lines in indica rice by exploiting somaclonal variation. *Euphytica: International Journal of Plant Breeding*, Wageningen, v. 145, n. 3, p. 221-227, 2005.

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.

SALET, R. L. *Toxidez de alumínio no sistema de plantio direto*. 1998. 109p. Tese (Doutorado) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. (Ed.). *Myths and science of soils of the tropics*. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p. 35-46. (SSSA, Special publication, 29).

- SANTOS, J. R.; BICUDO, S. J.; NAKAGAWA, J.; ALBUQUERQUE, A. W.; CARDOSO, C. L. Atributos químicos do solo e produtividade do milho afetados por corretivos e manejo do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, p.323- 330, 2006.
- SANTOS, M. de L. M. *Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (Oryza sativa L.)*. 1991. 176 f. Dissertação (Mestrado) - UFRRJ, Seropédica, 1991.
- SANZ J. I.; ZEIGLER R. S.; SARKARUNG S.; MOLINA D. L.; RIVERA, M. Sistemas mejorados arroz-pasturas para sabana nativa y pasturas degradadas em suelos ácidos de América del Sur. In: GUIMARAES, E.P.; SANZ, J.I.; RAO, I.M.; AMÉZQUITA, M.C.; AMÉZQUITA, E. (Eds.). *Sistemas Agropastoriles en Sabanas de América Latina*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Empresa, 1999.
- SCHAFFERT, R.E.; ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E. et al. Genetic variability in sorghum for efficiency and responsiveness. In: HORST, W.J. et al. (Ed.). *Plant nutrition- Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. p. 72-73.
- SCOTT, B.J.; FISCHER, J. A.; SPOHR, L. J. Tolerance of Australian wheat varieties to aluminium toxicity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 23, n. 5/6, p. 509-526, 1992.
- SILVA, L.M. *Crescimento radicular e absorção de nutrientes de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva*. 2007.103p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- SILVA, A. A. *Toxicidade de alumínio em trinta genótipos de Panicum maximum Jacq. Cultivados em solução nutritiva*. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997. 149 p.
- SILVA, I. R.; SMYTH, T.J.; MOXLEY, D.F.; CARTER, T.E.; ALLEN, N.S.; RUFTY, T.W. 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. M.; COSTA, N. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; VIEGAS, P. R. A. Sistema radicular de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva. *Agrarian*, Dourados, v. 4, n. 13, p. 202-212, 2011.
- SILVA, T. R. B.; LEMOS, L. B. Efeito da calagem superficial em plantio direto na concentração de cátions hidrossolúveis na parte aérea de culturas anuais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.32, p.1199-1207, 2008.
- SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C. da; CUNHA, A. A. da. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, out. 2000.
- SIVAGURU, M.; FUJIWARA, T.; SAMAJ, J.; BALUSKA, F.; YANG, Z.; OSAWA, H.; MAEDA, T.; MORI, T.; VOLKMANN, D.; MATSUMOTO, H. Aluminum-induced 1-->3-

beta-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.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; MELLO, F. F. C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. *Bragantia*, Campinas, v. 69, n. 4, p. 965-974, 2010.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; LOBATO, E.; KLIEMANN, H. J. Avaliação de métodos para determinar as necessidades de calcário em solos de Cerrados de Goiás e do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 4, n. 2, p. 144-148, 1980.

SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. New York: Oxford University, 1989.

TANAKA, R. T.; PONTE, A. M.; MORAIS, O. P. *Interação entre níveis de calcário, fósforo e zinco na cultura de arroz (Oryza sativa L.) de sequeiro em solos de cerrado*. Belo Horizonte: EPAMIG. 1983. p. 215-229.

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

TAYLOR, G. J. The physiology of aluminum tolerance higher plants. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.19, n. 7/12, p. 1179-1194, 1988.

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

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

VANCE, G. F.; STEVENSON, F. J.; SIKORA, F. J. Environmental chemistry of aluminum organic complexes. In: SPOSITO, G. *The environmental chemistry of aluminum*. Boca Raton: Lewis, 1995. p.169-220.

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

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

VERA, R. Investigación en sistemas agropastoriles: antecedentes y estrategias. In: GUIMARÃES, E. P.; SANZ SOVINO, J. I.; RAO, I. M.; AMEZQUITA, M. C.; AMEZQUITA COLLAZOS, E. (Ed.). *Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de America Latina*. Cali, Colômbia: CIAT, Brasília: EMBRAPA, 2000. p. 1-6.

- VICENTE, F. M. P.; PEREYRA ROSSIELLO, R. O.; PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. I. Crescimento em solução nutritiva. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 1, p. 9-15, jan. 1998a.
- VICENTE, F. M. P.; PEREYRA ROSSIELLO, R. O.; PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. II. Correlação canônica com produção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 1, p. 49-54, jan. 1998b.
- VON UEXKULL K.; MUTERT E. Global extent development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, Dordrecht , v. 171, p. 1–15, 1995.
- WANG, J.; RAMAN, H.; ZHANG, G.P.; MENDHAM, N.; ZHOU, M.X. 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.
- WATANABE, T.; OSAKI, M. Mechanism of adaptation to high aluminum condition in native plant species growing in acid soils- A review. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 33, p. 1247-1260, 2002.
- WRIGTH, 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.
- YANG, J.; YOU, J.; LI, Y.; WU, P.; ZHENG, S. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity. *Plant & cell physiology*, Tokio, v. 48, p. 66-73, 2007.
- YOUNG, M. D.; SOLBRIG, O. T. (Ed.). *The world's savannas: economic driving forces, ecological constraints and policy options for sustainable land use*. Paris: UNESCO, 1993.
- 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.
- ZHANG, G.; TAYLOR, G. J. Effect of aluminum on growth and distribution of aluminum in tolerant and sensitive cultivars of (*Triticum aestivum*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 7/12, p. 1195-1205. 1988.