

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Curso de Fitomelhoramento



Dissertação

**TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
COLOMBIANOS E BRASILEIROS**

Diana Carolina Leiva Cortés

Pelotas, 2018

Diana Carolina Leiva Cortés

**TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
COLOMBIANOS E BRASILEIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (Área de concentração: Agronomia – Fitomelhoramento).

Orientador: Antonio Costa de Oliveira, PhD (UFPel)

Coorientadores: Ariano Martins Magalhães Júnior, Dr (EMBRAPA)

Rogério Oliveira de Souza, Dr (UFPel)

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C827t Cortés, Diana Carolina Leiva

Tolerância ao alumínio em cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) colombianos e brasileiros. / Diana Carolina Leiva Cortés ; Antonio Costa de Oliveira, orientador ; Ariano Martins Magalhães Júnior, Rogerio Oliveira de Souza, coorientadores. — Pelotas, 2018.

107 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Cultivares irrigadas e sequeiro. 2. Melhoramento vegetal. 3. Estresse abiótico. I. Oliveira, Antonio Costa de, orient. II. Magalhães Júnior, Ariano Martins, coorient. III. Souza, Rogerio Oliveira de, coorient. IV. Título.

CDD : 633.18

Diana Carolina Leiva Cortés

**TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM CULTIVARES DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
COLOMBIANOS E BRASILEROS**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 10 de abril de 2018.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antonio Costa de Oliveira (Orientador)
Doutor em Genética pela Universidade de Purdue.

Dr. Ariano Martins de Magalhães Junior (EMBRAPA)
Doutor em Ciências área de concentração Fitomelhoramento pela Universidade Federal de Pelotas

Dra. Edgar Alonso Torres Toro (RICETEC)
Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo

Prof. Dra. Rosa Lía Barbieri (EMBRAPA)
Doutora em Genética e Biologia Molecular pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

“Dedico este triunfo a meus pais BELMA e ESPER e meu irmão CAMILO pelo apoio e força que me deram neste tempo e especialmente aos pequenos da família Mafe (minha irmã) e meus primos Juan Diego, Julian David, Julio Enrique, Juan José, Maria Angel, Isabella e Gabi para que eles tenham como um exemplo que as conquistas se alcançam com esforço e dedicação... Este triunfo mais que meu, é de todos vocês, AMO MUITO VOCÊS”.

"Dedico este triunfo a mis papas BELMA y ESPER y mi hermano CAMILO por el apoyo y fuerza que me dieron en este tiempo y especialmente a los pequeños de la familia, Mafe (mi hermana) y mis primos Juan Diego, Julian David, Julio Enrique, Juan José, Maria Angel, Isabella e Gabi para que tengan como un ejemplo que las conquistas se alcanzan con esfuerzo y dedicación... Este triunfo más que mío, es de todos ustedes... LOS AMO MUCHO".

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Belma, quero agradecer você por tudo o que tu me deste na minha vida. Mãe amo muito você e hoje sou uma grande mulher pelo exemplo e pelo ensino, teu amor e dedicação. Mãe meu muito obrigada por ser minha mãe.

A meu pai Esper por ser esse grande homem que desde criança me ensinou ser uma mulher valente e acreditar em que as coisas com sacrifício, dedicação e amor se conseguem. Por ensinar-me o que realmente é o amor pela natureza. Obrigada pai por ser meu pai.

A meu irmão Camilo por permitir que eu seja tua irmã mais velha, por todas as aventuras vividas desde crianças e que hoje permitem que sejamos os melhores irmãos do mundo. Pelas aventuras que já vivemos e por todas as que virão. Obrigada irmão, te amo muito. A minha irmã Mafe obrigada por cada sorriso e por cada aventura louca que vivemos juntas. Obrigada Wafercita, eu te quero muito.

As minhas avós Gilma e Margot, as matriarcas das famílias que são a maior inspiração das nossas vidas, a vocês muito obrigada por tudo seu carinho e amor incondicional sempre. A meus avôs Enrique e Nestor, e minha tia Margot (in memoriam) porque eu sei que vocês sempre estão comigo onde for que eu esteja, vocês são meus anjos e sempre cuidam de mim e dos meus passos. Meus tios Miguel, Mirto, Nestor, Mi Chuchi e Renzin, e minhas tias, Chavis, Mayito, Nohora, Norma, Osmý e Marria porque sempre encontrei carinho e amor em cada abraço de vocês, porque foram quem ajudaram aos meus pais na minha educação sendo os “alcahuetas” da história.

Meus primos Banana, Belita, a pequena Gabi, Gata, Juan Di, Juan Joje, Juanchito, Juli, MariAngel e Uyo Kikito embora sejam mais de 30 anos separam do mais velho ao mais novo, obrigada por cada um dos nossos momentos de muitos sorrisos e por permitir-me disfrutar de cada uma das gerações. Quero milhões todos vocês.

As minhas cachetonas Dany pela paciência e apoio incondicional desde o primeiro momento, Fabi por compartilhar comigo uma das minhas paixões, o “fute” e por ensinar-me tantas coisas como só uma mãe faz, por abrir as portas da tua casa e

da tua família para mim, Mariana por corrigir meu português, pelas tantas histórias e aventuras vividas, por aceitar minhas implicâncias contigo e por tornar-me torcedora do Xavante, Solange porque embora não tinha sido muito o tempo que compartilhamos, tu foi uma pessoa muito importante na minha chegada e Vivi pelo apoio em meu trabalho e pelos conselhos recebidos. Minhas cachetonas vocês foram as minhas amigas e confidentes, minhas mães quando precisei, se tornaram parte da minha família e tenho que agradecer o mais importante, a nossa amizade, e eu tenho certeza que esta história não termina aqui... esta história continua.

Aos meus amigos colombianos no Brasil, César, Joao, Johan, Juan, Marce, Vero e Vivi, por compartilhar muitos momentos longe das nossas famílias e nossas raízes, por abrir seus braços e me receber do melhor jeito possível. Obrigada “Parceritos”.

A Renata Zanella por sempre estar ao pendente de mi, por tua amizade. E em especial a Dani de Brum, porque tu foste a primeira pessoa que sem me conhecer abriu as portas da tua casa para mim, por tudo o apoio, pelo incentivo e pelas noites que me escutaste.

Aos meus amigos da Colômbia Aida, Carlitos, Cesar, Clailene, Karen, Madrinita, Merchait, Monais, Ligi, Raulito, Saris e Sergio, por sempre ficarem do meu lado apesar da distância.

Ao Ricardo por me incentivar a viver esta aventura e contribuir no ensino desde a minha formação básica no melhoramento até alcançar esta meta, pela paciência e por sobre tudo pela grande amizade brindada.

A minha chefe Patricia Guzmán e os diretivos de FEDEARROZ pelo apoio no desenvolvimento da minha profissão e pela oportunidade do tempo para meus estudos. Meus colegas Gabriel, Johanna, Jose Omar, Natalia e Nelson, por toda a experiência que vocês me transmitiram nos anos que trabalhamos juntos.

Aos professores Camila, Carol, Flavio, Gustavo, Luciano, Nardino, Odir, Rosa Lia e em especial a meu orientador Antonio por todo o ensino transmitido. Aos meus colegas do CGF pelo apoio sempre nos meus estudos e trabalhos e sempre ter disposição de ajuda.

A Universidade Federal de Pelotas e ao Centro de Genômica e Fitomelhoramento pela oportunidade de fazer parte e participar do seu grupo de pesquisa.

A EMBRAPA Clima Temperado – Estação Experimental de Terras Baixas, pela possibilidade da condução do meu experimento nas suas instalações.

A CAPES pela oportunidade da bolsa.

...hicieron un amor tranquilo y sano, de abuelos percutidos, que iba a fijarse en su memoria como el mejor recuerdo de ese viaje lunático...Era como si se hubieran saltado el arduo calvario de la vida conyugal, y hubieran ido sin más vueltas al grano del amor". Do livro "El amor en los tiempos del cólera.

(Gabriel García Márquez)

Resumo

CORTÉS, Diana Carolina Leiva. **Tolerância ao alumínio em cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) colombianos e brasileiros**. 2018. 107p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de concentração: Fitomelhoramento) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS. 2018.

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, porém a produção mundial é insuficiente e deve aumentar para suprir a demanda do crescimento populacional. O aumento da produção está sofrendo limitações pois novas áreas de cultivo estão sujeitas a estresses bióticos e abióticos, limitando a sua utilização. Algumas destas áreas apresentam altos níveis de alumínio que são tóxicos para a cultura, tornando-se importante estudar a resposta de diferentes genótipos de arroz sob estresse pelo Al^{3+} . O objetivo deste estudo foi avaliar a resposta do arroz quanto à tolerância ao alumínio tóxico sob diferentes concentrações, visando obter parâmetros morfológicos ligados a tolerância ao Al^{3+} e identificar genótipos tolerantes. Foram realizados dois experimentos nos quais 22 genótipos de arroz (21 - indica e 1 - japonica) foram avaliados. No primeiro experimento, em sistema hidropônico, as plantas foram mantidas em recipientes de 700mL com tampa de nylon, contendo solução nutritiva com quatro concentrações de Al^{3+} (0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹), pelo período de 14 dias e após foram avaliados o comprimento da parte aérea, da primeira e da segunda folha, inserção da primeira e segunda folha, número de raízes, comprimento máximo do sistema radicular, massa da matéria seca de raiz e da parte aérea. No segundo experimento, em casa de vegetação, as plantas foram mantidas em baldes com solo contendo duas concentrações de Al^{3+} (0 e 3,5 cmol_c dm⁻³), as plantas foram avaliadas durante todo o ciclo da cultura. Na fase inicial, foram avaliados: altura de plântula, número de afilhos e folhas/afilho, área foliar afetada (por amarelecimento, clorose e senescência); número de folhas e afilhos mortos (por amarelecimento, clorose e senescência). No final do ciclo foram avaliados: florescimento, maturação, comprimento e largura da folha bandeira; comprimento do colmo; número de colmos por planta; percentual de fertilidade da espiguetas; exerceção da panícula; comprimento da panícula; número de panícula por planta; número de grãos por panícula; arista; degreane; índice de colheita, massa de 100 grãos. Para as avaliações nas raízes foram determinados: o ângulo de abertura, área, largura máxima, comprimento, profundidade de largura máxima da raiz e massa de raiz. Doenças importantes na cultura do arroz também foram avaliadas, utilizando escala de avaliação proposta pelo Instituto Internacional para a Pesquisa em Arroz (IRRI). Como resultados os genótipos Gen7 e Gen15 são considerados materiais promissores para futuras análises. Os genótipos Gen3 e Gen6 com 10 mg L⁻¹, Gen5 com 20 mg L⁻¹, Gen18 nas concentrações de 10, 20 e 30 mg L⁻¹ e Gen14 com 30 mg L⁻¹ de alumínio, apresentaram tolerância a esse elemento químico. As variáveis comprimento da parte aérea e segunda folha, juntamente com a massa da matéria seca de raiz podem ser usadas para discriminar genótipos sensíveis e tolerantes ao estresse por alumínio, em períodos curtos de exposições.

Palavras-chave: Cultivares irrigadas e sequeiro; Melhoramento vegetal; Estresse abiótico.

Abstract

CORTÉS, Diana Carolina Leiva. **Aluminum tolerance in Colombian and Brazilian Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars**. 2018. 107p. Master's degree in Agronomy - Concentration Area: Plant Breeding - Postgraduate Program in Agronomy, Department of Plant Science, University Federal of Pelotas, Pelotas, RS. 2018.

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most produced and consumed cereals in the world. However, this production is not sufficient to sustain the growing demand caused by the population increase. Production increases are under limitation since new cultivation areas are subjected to biotic and abiotic stresses. Some areas present high aluminum levels that are toxic to the rice crop, making it important to study the response of different genotypes under Al^{3+} stress. The goal of this study was to evaluate the rice response regarding toxic aluminum under different concentrations, aiming to obtain morphological parameters linked to Al^{3+} and to identify tolerant genotypes. Two experiments were performed, in which 22 rice genotypes (21 - indica and 1 - japonica) were evaluated. In the first experiment, under hydroponics, plants were maintained in 700mL pots with a nylon lid, containing nutrient solution with four Al^{3+} concentrations (0, 10, 20 and 30 $mg\ L^{-1}$), for a 14 day period. Shoot length, first and second leaf length, root number, root length, root and shoot dry matter were measured. In the second experiment, in greenhouse, plants were maintained in pots with soil containing two Al^{3+} concentrations (0 and 3,5 $cmol_c\ dm^{-3}$), plants were evaluated during the whole cycle. In the initial phase, the following traits were evaluated: seedling height, number of tillers, number of leaves per tiller, affected leaf area (by chlorosis, yellowing and senescence); number of dead leaves and dead tillers (by chlorosis, yellowing and senescence). At the end of the cycle the following traits were evaluated: flowering, maturation, flag leaf length and width; culm length; number of culms per plant; percentage of spikelet fertility, panicle exertion; panicle length; number of panicles per plant; number of grains per panicle; awns; shattering, harvesting index, weight of a hundred grains. For the root evaluations, the following traits were measured: root angle, area, maximum width, length; deepness of maximum root width and root mass. Important diseases in the rice crop were also evaluated, using the scale proposed by IRRI. As a result, the genotypes Gen7 and Gen15 are considered promising genotypes for further investigations. The genotypes Gen3 and Gen6 at 10 $mg\ L^{-1}$, Gen5 with 20 $mg\ L^{-1}$, Gen18 at the concentrations of 10, 20 and 30 $mg\ L^{-1}$ and Gen14 at 30 $mg\ L^{-1}$ aluminum, presented tolerance to this element. The variables shoot and second leaf length, as well as root dry matter can be used to discriminate between tolerant and sensitive genotypes to aluminum stress, under short exposition periods.

Key-Words: Irrigated and upland rice cultivars; Plant breeding; Abiotic stress.

Lista de Figuras

Capítulo I – Revisão Bibliográfica

Figura 1 – Hipótese proposta por Chang 1976 sobre a origem do arroz.....24

Figura 2 - Distribuição dos tipos de solos no mundo. A cor vermelha indica solos ácidos; amarelo, solos neutros; azul, solos alcalinos; e, preto, sem dados.....27

Capítulo II - Avaliação de genótipos de arroz (*Oryza sativa* L.) em condições controladas de hidroponia sob diferentes concentrações de alumínio

Figura 1 - Comprimento da parte aérea (cm) (A) e segunda folha (cm) (B) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....45

Figura 2 - Comprimento da primeira folha (cm) (A), inserção da primeira folha (cm) (B), inserção da segunda folha (cm) (C) e número de raízes (D) para a cultura do arroz em função das diferentes concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....48

Figura 3 - Comprimento máximo do sistema radicular (cm) (A) e massa da matéria seca de raiz (g) (B) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....52

Figura 4 – Massa da matéria seca da parte aérea (g) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....55

Figura 5 - Plotagem dos escores e das cargas dos CP1-CP2 referente as variáveis dependentes mostrando o comportamento dos genótipos (A), das concentrações de alumínio (0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹) (B), e da interação (C) entre os genótipos e as concentrações. CPA: comprimento da parte aérea;

CPF: comprimento da primeira folha; CSF: comprimento da segunda folha; IPF: comprimento da inserção da primeira folha; ISF: comprimento da inserção da segunda folha; NR: número de raízes; CR: comprimento máximo do sistema radicular; MSR: massa da matéria seca de raiz; MSPA: massa da matéria seca da parte aérea.....58

Capítulo III - Avaliação de genótipos de arroz quanto a tolerância ao alumínio tóxico em casa de vegetação

Figura 1 - Altura de plântulas (cm) (A), número de afilhos (B) e número de folhas/afilhos (C) de arroz em função das concentrações de alumínio em diferentes épocas de avaliação. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18. (As barras verticais representam a DMS pelo teste t ($p \leq 0,05$)).....72

Figura 2 - Plotagem dos escores e das cargas dos CP1-CP2 referente as variáveis dependentes mostrando o comportamento dos genótipos na ausência (A) e presença de Al^{3+} (B), e a interação (C) entre os genótipos e as concentrações de Al^{3+} (0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Variáveis dependentes: vigor; altura de plântula (Altura); número de afilhos (N Afilhos); número de folhas/afilho (N Folhas); floração plena (Flora); maturação (Matura); comprimento da folha bandeira (Comp FI Ban); largura da folha bandeira (Larg FI Band); comprimento do colmo (Compr Colmo); número de colmos por planta (N Colmo PI); percentual de fertilidade da espiguetta (Fert Espig); exerceção da panícula (Exer Pan); comprimento da panícula (Compr Pan); número de panícula por planta (N Pan PI); número de grãos por panícula (N Grãos Pan); arista; degreane; índice de colheita (IC), massa de 100 grãos (M 100); massa de raiz (M Raiz); ângulo de abertura (Ângulo Raiz), área de raiz (Área Raiz), largura máxima de raiz (Larg Max Raiz), comprimento de raiz (Compr Raiz), profundidade de largura máxima da raiz (Prof Larg Mx Raiz).....91

Figura 3 - Valores médios, segundo escala IRRI (2002), para Mancha dos grãos (A), *Rhizoctonia solani* (B) e Mal do pé (*G. graminis*) (C) para os diferentes genótipos de arroz. (As barras verticais representam o erro padrão).....92

Figura 4 - Comparação do efeito causado nas raízes sob os tratamentos com presença (A) e ausência de Al^{3+} (B).....	93
---	----

Lista de Tabelas

Capítulo II - Avaliação de genótipos de arroz (*Oryza sativa* L.) em condições controladas de hidroponia sob diferentes concentrações de alumínio

Tabela 1 - Genótipos avaliados e seus respectivos sistemas de plantio..... 39

Tabela 2 - Comprimento da parte aérea (cm) e segunda folha (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18. 44

Tabela 3 - Comprimento da primeira folha (cm), inserção da primeira e segunda folha (cm) e número de raízes para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18..... 47

Tabela 4 - Comprimento máximo do sistema radicular (cm) e massa da matéria seca de raiz (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....51

Tabela 5 - Massa da matéria seca da parte aérea (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....54

Capítulo III - Avaliação de genótipos de arroz quanto a tolerância ao alumínio tóxico em casa de vegetação

Tabela 1 - Características químicas e físicas da amostra de solo coletada em Passo Fundo - RS, antes da instalação do experimento.....64

Tabela 2 - Agentes causais e nomes das doenças avaliadas.....67

Tabela 3 - Vigor, altura de plântulas (cm), número de afilhos e número de folhas/afilhos para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....71

Tabela 4 - Duração da floração plena e maturação (dias após o plantio - DAP), comprimento e largura da folha bandeira (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	76
Tabela 5 - Comprimento do colmo (cm), número de colmos/planta, fertilidade da espiguetta (%) e exerceção da panícula para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	79
Tabela 6 - Comprimento da panícula (cm), número de panícula/planta, número de grãos/panícula e arista para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	82
Tabela 7 - Degrane, índice de colheita, massa de 100 grãos (g) e raiz (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	84
Tabela 8 - Ângulo de abertura da raiz, área da raiz (cm ²), largura máxima da raiz (cm) e comprimento da raiz (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	87
Tabela 9 - Profundidade de largura máxima de raiz (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.....	88

Sumário

Resumo.....	9
Abstract.....	10
Lista de Figuras.....	11
Lista de Tabelas.....	14
1. Introdução Geral.....	18
2. Revisão Bibliográfica.....	21
2.1. A cultura do arroz.....	22
2.1.1. Classificação botânica, origem e domesticação do arroz.....	22
2.1.2. Importância econômica da espécie <i>Oryza sativa</i> L.....	25
2.1.3. Caracterização morfológica do arroz.....	26
2.2. O alumínio no solo.....	27
2.3. O alumínio, um dos principais limitantes nos solos colombianos.....	29
2.4. Sistemas de cultivo e a importância da tolerância da toxicidade do Alumínio. 29	
2.5. Aspectos fisiológicos da toxidez por alumínio.....	30
2.6. Absorção e transporte do alumínio nas plantas.....	31
2.7. Melhoramento do arroz.....	32
2.8. Novas técnicas de melhoramento.....	34
3. Avaliação de genótipos de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) em condições controladas de hidroponia sob diferentes concentrações de alumínio.....	35
3.1. Introdução.....	36
3.2. Material e métodos.....	38
3.3. Resultados e discussão.....	41
3.4. Conclusões.....	59

4. Avaliação de genótipos de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) quanto a tolerância ao alumínio tóxico em casa de vegetação.....	60
4.1. Introdução.....	61
4.2. Material e métodos.....	63
4.3. Resultados e discussão.....	68
4.5. Conclusões.....	94
5. Considerações finais.....	95
Referências.....	96

1 Introdução geral

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO, 2017). Mais de 90% do arroz mundial é cultivado e consumido na Ásia atendendo a demanda de mais de 60% da população mundial (DOGARA; JUMARE, 2014; KHUSH, 1997). De acordo com a FAO e o Instituto Internacional para a Pesquisa em Arroz (IRRI), a cultura do arroz exige maiores produções para atender a demanda de alimentos, já que para o ano 2050 estima-se que a demanda aumente pelo menos em 60% em relação aos níveis do ano de 2016, isto se deve pelo crescimento demográfico e a rápida urbanização (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, 2016). Para empresas de pesquisa como a Federação Nacional do Arroz (FEDEARROZ) na Colômbia ou a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) no Brasil, a produtividade é considerada uma prioridade nas pesquisas agrícolas e especificamente nas áreas produtoras de arroz. Infelizmente, a grande maioria das novas áreas agrícolas não apresentam as melhores condições de infraestrutura e fertilidade, sendo claramente áreas menos produtivas devido a graves limitações para a produção de alimentos, como por exemplo, problemas relacionados com características químicas dos solos como acidez acentuada, produzida pelo excesso de alumínio e/ou ferro (FAGERIA; STONE, 1999). A América Latina, a Colômbia e o Brasil não diferem dessa situação, sendo que a produtividade da cultura do arroz é muito bem definida em áreas de irrigação (BEUTLER et al., 2012). No entanto, o ganho genético para a produtividade não é expressivo e não acompanha o aumento de demanda, com o agravante que nestas mesmas áreas é cada vez mais custosa a produção, sobretudo quando se semeia sob o esquema de semeaduras de arroz nos dois semestres do ano como no caso da Colômbia. Por essa razão existe a necessidade de expandir áreas de produção para onde se possa minimizar o efeito causado pelo estresse por excesso de alumínio (Al^{3+}), sendo este um dos principais limitantes destas áreas (FAO, 2016). A problemática na produção da cultura de arroz relacionada a baixos rendimentos está

sendo compensada com custos menores de produção, através da utilização rentável dessas áreas; a produção de culturas de sequeiro, a utilização de cultivares melhoradas mostra-se como um melhor caminho para a competitividade, sendo que conta com o apoio de programas especiais como é o caso do programa *Adopción Masiva de Tecnología* (AMTEC) na Colômbia, o qual tem como um dos principais objetivos aumentar a produtividade e baixar os custos de produção, com isto incrementa-se a rentabilidade e também reduzindo danos ao meio ambiente (FEDERACIÓN NACIONAL DE ARROCEROS, 2015).

Os programas de melhoramento em vários países visam obter variedades com alta produtividade, qualidade industrial e que suportem condições ambientais extremas tanto bióticas como abióticas em cada região arroseira, alcançando alguns objetivos em âmbito de melhoramento convencional. No entanto, existe pouca utilização das técnicas de biotecnologia na obtenção de genótipos e de variedades que atendam a todas as exigências do mercado e que apresentem tolerância aos estresses abióticos como por exemplo estresses por calor e/ou frio e pelo excesso ou déficit de metais/nutrientes como o alumínio.

O alumínio é o fator mais limitante do crescimento e produtividade nos solos ácidos do mundo, que abrangem mais de 40% da superfície agrícola. No caso da Colômbia, aproximadamente 85% do território está composto por solos ácidos nos quais a produtividade de plantas fica restringida pela acidez do solo e a toxicidade pelo Al^{3+} (POSADA; AVENDAÑO, 2007). No Brasil não é diferente esta situação pois os solos do cerrado e de várzea são exemplos de solos com problemas de deficiência e ou toxidez nutricional, pouca atividade microbiana e pouca acumulação de água (FAGERIA; STONE, 1999); quase 25% do território nacional tem problemas nutricionais pela presença em excesso de alumínio, essas áreas concentram-se nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Piauí (FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006). Diante do exposto, torna-se inevitável refletir a respeito de diferentes soluções para os problemas relacionados com o estresse por Al^{3+} , visando encontrar um meio de proporcionar um incremento para a produção mundial do arroz e reduzir a fome mundial.

O trabalho apresentado será de grande importância para desenvolver avanços tecnológicos que poderão aportar novas técnicas para posterior utilização em programas de melhoramento que visem a obtenção de cultivares adaptadas ao estresse. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é caracterizar genótipos de arroz

quanto a tolerância ao estresse por alumínio, visando identificar constituições genéticas superiores que possibilitem a utilização de áreas agrícolas marginais da Colômbia, do Brasil e América Latina.

2 CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do arroz

2.1.1 Classificação botânica, origem e domesticação do arroz

O arroz pertence à divisão Angiosperma, classe monocotiledônea, ordem Glumiflora, família Poaceae (chamadas antes de Gramineae), subfamília Bambusoideae ou Oryzoideae, tribo Oryzeae, e gênero *Oryza*. O arroz pode ser anual ou perene, o que possibilita que chegue a produção em condições de solos irrigados ou de sequeiro (GOMES; MAGALHÃES JUNIOR, 2004). As espécies cultivadas no mundo são *O. sativa* e *O. glaberrima* Steud, as duas são diploides com $2n=24$ cromossomos (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006; AUSTRALIAN OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR, 2005; MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008).

A cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) se originou há cerca de 10.000 anos, em muitas regiões úmidas da Ásia tropical e subtropical. Mundialmente ocupa o segundo lugar em superfície colhida após do trigo (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006; AUSTRALIAN OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR, 2005).

A origem do cereal ainda não está bem definida, mas possivelmente seja a Índia o país em que foi cultivado pela primeira vez, devido ao fato de que neste local foram encontrados muitos tipos de arroz selvagem. Mas o desenvolvimento da cultura teve lugar na China, desde suas terras baixas à suas terras altas. Provavelmente houve várias rotas pelas quais foi introduzido o arroz da Ásia para outras partes do mundo (DOGARA; JUMARE, 2014). Alguns autores sugerem que a propagação do arroz teve dois lugares de início, sendo o sudeste asiático e a Índia, até a China, há aproximadamente 3.000 anos aC. Desde a China, foi levado para a Coreia e logo para o Japão (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006; MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008). Do sul da China, provavelmente foi introduzido nas Filipinas. No mesmo tempo pelo sul da Índia, e pela rota da Malásia foi levado para a Indonésia, da Índia foi para Ceilão. Pérsia, foi o lugar de onde espalhou a oeste da Índia, chegando na região do Turquistão e logo à Mesopotâmia e à Arábia posteriormente espalhou-se à Turquia e à Síria. A expansão continuou sendo levada ao Egito, Marrocos e Espanha (MAGALHÃES; OLIVEIRA,

2008), logo espalhou-se para a Itália e Portugal. Finalmente foi trazido para a América pelos espanhóis e ao Brasil pelos portugueses, considerando-se este último país o primeiro lugar onde foi cultivado na América (CONAB, 2015). Em 1850 o arroz já era cultivado no Vale do Rio Magdalena, na Colômbia, graças a introdução realizada pelos espanhóis (MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008).

Analisando estudos prévios se conclui que existem duas rotas evolutivas do arroz cultivado, a rota da Ásia de onde se espalhou a espécie *Oryza sativa* L. há 10.000 anos e a rota da África de onde originou-se o *Oryza glaberrima* há 3.000 anos (STEIN et al., 2018; SWEENEY; MCCOUCH, 2007). A origem e distribuição do gênero *Oryza* aconteceu em diferentes lugares do mundo: *O. sativa*, *O. granulata*, *O. meyeriana*, *O. nivara*, *O. rufipogon*, *O. minuta*, *O. rhizomatis*, são originários da Ásia; *O. glaberrima*, *O. barthii*, *O. longistaminata*, *O. punctata*, *O. brachyantha* originários da África; *O. glumaepatula*, *O. latifolia*, *O. alta*, *O. grandiglumis*, na América e *O. australiensis* e *O. meridionalis* na Austrália (MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008; SWEENEY; MCCOUCH, 2007).

Como ilustrado na Figura 1, existem duas espécies cultivadas, porém considera-se a cultura do arroz como uma única planta, possuindo 27 espécies selvagens do gênero *Oryza*: a espécie *O. glaberrima* (africana) e a espécie *O. sativa* (asiática) sendo esta última a mais popular no mundo devido à sua grande importância para suprir a demanda na alimentação humana (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006; DOGARA; JUMARE, 2014; MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008; STEIN et al., 2018). Embora existam muitas semelhanças entre si, seus genomas (11 tipos, 6 deles diploides e 5 poliploides) (STEIN et al., 2018) são diferentes, por isso, o genoma da *O. sativa* é ilustrado por AA e a *O. glaberrima* ilustrado por AgAg. Mesmo que elas possam ter hibridação natural, o cruzamento dependerá da interação entre o genótipo e o ambiente, sendo predominantemente autógamas (MAGALHÃES; OLIVEIRA, 2008). As variedades asiáticas foram encontradas e delas foram selecionados grãos maiores até obter a espécie *O. sativa*, que deu origem à três subespécies diferentes: Índica, Japônica e Javânica (Japônica tropical) (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006).

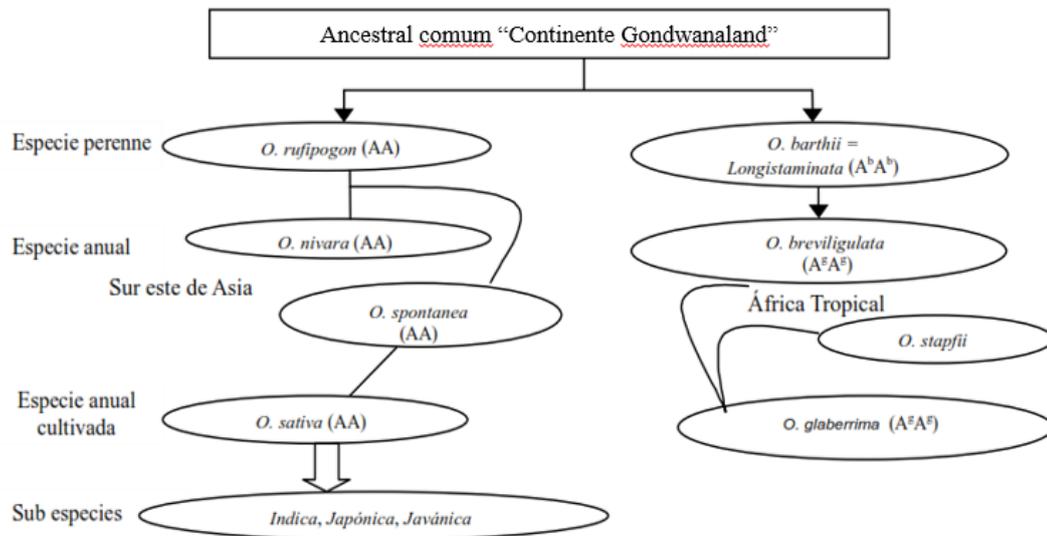


Figura 1 - Hipótese proposta por Chang 1976 sobre a origem do arroz.

Fonte: (CHANG, 1976).

O genoma do arroz (*Oryza sativa* L.) subsp. japonica cv. Nipponbare foi sequenciado totalmente no ano de 2005, sendo a primeira espécie em ter seu genoma completamente sequenciado, graças a cooperação internacional que existiu no Projeto Internacional de Sequenciamento do Genoma do Arroz (IRGSP- International Rice Genome Sequencing Project) integrado por 10 países (MATSUMOTO et al., 2005).

Pesquisas mais atuais realizaram estudos genéticos e arqueológicos para estudar e tentar chegar na verdade da origem do arroz, para isso estudaram as relações filogenéticas e a histórica demográfica. Os resultados mostraram que tanto indica como japônica foram originadas independentemente. Porém, os genes que controlam as características de domesticação foram achados em ambas subespécies com alelos iguais, determinando desta forma uma única origem de domesticação (HUANG et al., 2012).

As atuais cultivares de *O. sativa* são obtidas através de cruzamentos e combinações inter-raciais e eles são distribuídos pelo mundo. A espécie africana, *O. glaberrima*, que apresenta uma menor diversidade, foi obtida a partir de duas espécies selvagens.

O arroz é uma gramínea, autógama, que cresce com maior facilidade nos climas tropicais. Originariamente, o arroz foi uma planta semeada em solo de sequeiro, mas com as mutações se converteu em semiaquática. Embora possa

crescer em meios muito diferentes, o seu crescimento ocorre mais rapidamente em um meio quente e úmido (FISHER, 1992).

Uma das principais mudanças que se teve na domesticação do arroz foi a diminuição do degrane da panícula, facilitando a coleta, além da adaptação ao trópico ou climas temperados (desde latitude de 35° sul na Argentina à 50° norte na China), ampla faixa de solos (110 países, desde o nível do mar até 3000 metros de altitude), uma maior ou menor dependência da água durante seu ciclo de vida (ACEVEDO; CASTRILLO, 2006; AUSTRALIAN OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR, 2005), hábito de crescimento, a redução da dormência das sementes, o rendimento geral, a qualidade do raquis, adaptações a habitats diversos e as propriedades culinárias dos grãos (CIVÁÑ; BROWN, 2017).

2.1.2 Importância econômica da espécie *Oryza sativa* L.

O arroz (*Oryza sativa* L.), é uma das mais importantes culturas alimentares mundiais e uma fonte primária de calorias para mais da metade da população mundial (DOGARA; JUMARE, 2014), sendo o segundo cereal mais cultivado no mundo, tendo uma área de 168 milhões de hectares. A produção de 741 milhões de toneladas de grãos em casca corresponde a 29% do total de grãos consumidos na dieta humana. O consumo aparente médio mundial de arroz beneficiado é de 70 kg/pessoa/ano, sendo que os países asiáticos, onde a produção desse cereal chega a 91%, apresentam as médias mais elevadas (84,4 kg/pessoa/ano). Na América Latina, são consumidos, em média, 30 kg/pessoa/ano, destacando-se o Brasil como grande consumidor (45 kg/pessoa/ano) (SOSBAI, 2016). Devido à importância alimentícia e econômica mundial dessa cultura, existem muitos estudos que visam facilidade no manejo e a busca de alta produtividade.

A Ásia ocupa a primeira posição em consumo e produção mundial e a América do Sul a segunda em produção e a terceira em consumo. O Brasil é o nono produtor mundial de arroz. No Brasil a área de produção no ano 2016 foi de aproximadamente 2.000.000 de hectares, sendo aproximadamente 608 hectares de arroz sequeiro e 1400 hectares para o arroz irrigado, a produtividade média nacional no mesmo ano foi de 5.464 kg ha⁻¹ e a produção nacional foi de 10.622.189 toneladas (SOSBAI, 2016). Esses dados corroboram com a importância da cultura no país. Já na Colômbia, a

área para o ano de 2016 foi de 520.779 hectares, a produtividade média nacional no mesmo ano foi de 4.710 kg ha⁻¹ e a produção nacional foi de 2.453.364 toneladas (FAO, 2017), embora os dados sejam menores quando comparados com o Brasil, esses dados também elevam a importância da cultura do arroz no seu devido país.

2.1.3 Caracterização morfológica do arroz

O arroz é uma gramínea anual, colmos redondos e vazios, composta por nó e entrenó, as folhas de lâmina plana anexadas ao caule pela bainha e a sua inflorescência é uma panícula. O tamanho da planta varia entre 0,4 m (anãs) até mais de 7,0 m (flutuantes). Os órgãos são divididos em dois grupos: órgãos vegetativos: raízes, colmos ou caules e folhas; e os órgãos reprodutivos: flores e sementes.

As plantas de arroz possuem dois tipos de raízes, as seminais ou temporais e as secundárias, adventícias ou permanentes. As seminais são pouco ramificadas, vivem pouco tempo após a germinação e depois são substituídas pelas raízes adventícias ou secundárias as quais saem dos nós subterrâneos dos colmos novos. Os colmos são formados pelos nós e entrenós adjacentes, na sua superfície exterior não tem pêlos e seu brilho e sua cor variam de acordo com cada genótipo. Os colmos com as suas folhas formam o afilho, o conjunto de afilhos e o colmo principal formam a planta. As folhas estão distribuídas em forma alternada ao longo do colmo, em cada um dos nós se desenvolve uma folha, a folha superior embaixo da panícula é a folha bandeira. Nas folhas completas se identificam as seguintes partes: a bainha, o pescoço e a lâmina. As flores da planta de arroz estão agrupadas em uma inflorescência chamada panícula. A panícula está localizada sobre o nó apical do colmo. A ráquis ou eixo principal da panícula é vazio, dos seus nós nascem as ramificações. As protuberâncias na base da ráquis são chamadas de panículas. Em cada um desses nós nascem individualmente ou em pares, ramificações as quais originam as secundárias onde brotam as espiguetas. As espiguetas são formadas por duas lemas estéreis (lema e pálea) ou casca, a raquila e a flor. As sementes são constituídas pela casca, pericarpo, tegumento, camada de aleurona, endosperma amiláceo e embrião (CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT), 2005; GOMES; JUNIOR, 2004).

2.2 O alumínio no solo

O alumínio é o metal mais abundante e o terceiro elemento mais comum na superfície terrestre (ZHANG et al., 2007). Como demonstra a Figura 2, os solos ácidos são amplamente distribuídos em regiões tropicais e subtropicais, embora também estejam presentes em áreas de clima temperado, afetando até 40% dos solos potencialmente aráveis (HAUG; FOY, 1984); A toxicidade pelo alumínio é um dos principais fatores limitantes nos solos que sofrem pela acidez, sendo 14% dos solos do planeta afetados por este fator. Cerca de 67% destes solos ácidos estão cobertos por bosques e 18% são savanas, pastagens e vegetação desértica; sendo que somente 4,5% desses solos ácidos estão sendo utilizados para culturas (UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Na Colômbia, cerca de 80% dos solos são ácidos, em especial os solos localizados na região da Orinoquia (CAMACHO-TAMAYO; LUENGAS; LEIVA, 2008).

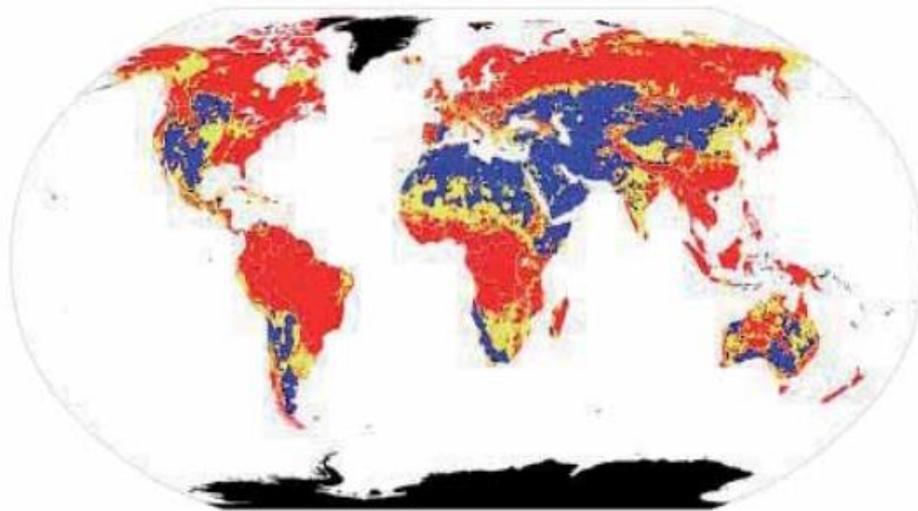


Figura 2 - Distribuição dos tipos de solos no mundo. A cor vermelha indica solos ácidos; amarelo, solos neutros; azul, solos alcalinos; e, preto, sem dados.

Fonte: (SERRA, 2016).

A área das Planícies Orientais na Colômbia está representada pelos estados de Meta, Casanare, Arauca e Vichada e são reconhecidos pelo alto índice de acidez dos solos principalmente pelo excesso de alumínio e/ou ferro. A principal cultura semeada nesta área é o arroz o qual se encontra em expansão e tem como principal

limitante a acidez do solo. Um método de manejo utilizado para controlar a acidez é a aplicação de calcário nos solos e a aplicação de nutrientes, mas esta técnica apenas permite mudar as propriedades químicas da camada da superfície do solo (CAMARGO; OLIVEIRA, 1981; HEDE; SKOVMAND; LÓPEZ-CESATI, 2001). Desse modo as plantas apresentam capacidade de suportar essa condição de estresse nos primeiros dias do ciclo vegetal, no entanto quando crescem, devido as suas raízes mais profundas, ocorre a exposição ao alumínio do solo evidenciando o problema da acidez, o que faz com que ocorra redução do potencial produtivo das plantas ou até mesmo à perda total delas.

Através de técnicas de melhoramento como o melhoramento convencional, molecular ou engenharia genética (CARREÑO; CHAPARRO-GIRALDO, 2013) é possível obter variedades que resistam a estas condições de estresse por excesso de alumínio.

O arroz (*Oryza sativa* L.) é considerado uma das culturas mais tolerantes ao estresse pelo alumínio (FAMOSO et al., 2010), mas na realidade há uma grande variabilidade entre as cultivares, incluindo aquelas muito sensíveis (MATSUMOTO, 2000). Sabe-se que a tolerância à concentração de alumínio pode diferir entre espécies e mesmo entre variedades dentro da mesma espécie. A toxidez por Al^{3+} , também é bastante representativa nos solos brasileiros, que além de altos índices de acidez, apresentam baixos teores de P, Ca e Mg (FREITAS et al., 2006).

A grandeza do problema de toxidez por alumínio está sujeita a quantidade dos nutrientes presentes no solo, de maneira especial o Mg e Ca, por conseguinte, a relação existente entre Mg/Al, Ca/Al e (Ca+Mg+K)/Al no solo tornam-se fatores muito importantes decidir a existência de toxidez por Al^{3+} . A qualidade do solo é reduzida com a presença do alumínio quando o solo tem pH abaixo de 5,5. Nessas condições, microorganismos benéficos como as micorrizas podem ser reduzidas e assim como os actinomicetos podem diminuir suas atividades, desfavorecendo sua atividade no solo e prejudicando sua condição ótima (POSADA; AVENDAÑO, 2007).

2.3 O alumínio, um dos principais limitantes nos solos colombianos

A necessidade da expansão de novas áreas agrícolas para as culturas e especificamente para a cultura do arroz, demanda a ocupação de áreas de baixa produtividade ou marginais, sem infraestrutura de irrigação, em solos sob condições agronômicas de baixa fertilidade e com acidez pronunciada (56% do total da área terrestre possui problemas por toxicidade do Al^{3+}), produto do excesso de alumínio e/ou ferro. Nesse sentido a utilização de variedades melhoradas que apresentem tolerância a este tipo de estresse e adaptação a estas condições vão permitir uma maior competitividade dos agricultores e a expressão do potencial genético dessas variedades (BALDINO et al., 2010).

O arroz na Colômbia, é semeado em todo o território nacional, tendo duas regiões que apresentam grandes diferenças ambientais e de manejo da cultura. A região do Centro, o Caribe úmido e o Caribe seco, formam uma região agroclimaticamente semelhante sob o sistema de irrigação, e a região das planícies orientais colombianas, onde o principal sistema de cultura é sob sequeiro, entre as quais destaca-se a zona de Piedemonte, onde o arroz é estabelecido em terraços altos e médios, a zona das planícies aluviais onde predominam as áreas das beiras dos rios e por último a zona alta (*altillanura*) onde predominam solos com baixos conteúdos de bases trocáveis e altas concentrações de Al trocável, baixa fertilidade e uma estação de períodos chuvosos (FEDERACIÓN NACIONAL DE ARROCEROS, 2015).

2.4 Sistemas de cultivo e a importância da tolerância da toxicidade do Alumínio

A toxidez de alumínio no arroz, e em consequência, a importância do uso de uma cultivar tolerante ou não, depende do sistema de cultivo. No Brasil o arroz é cultivado de duas formas, irrigado ou de terras altas, este último também denominado de sequeiro. No arroz irrigado, existem vários sistemas de cultivo. Dentre eles, o sistema de semeadura direta em linha, especialmente utilizado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, neste a submersão da cultura é feita alguns dias depois a emergência das plântulas, normalmente quando estas apresentam três folhas verdadeiras, aproximadamente aos 15 dias após a emergência; e a lâmina de água é mantida até

a colheita (SOSBAI, 2016). E o sistema de pre-germinado (semeadura de sementes germinadas sob solo alagado), onde o solo já está na condição de alagamento antes da semeadura (SOSBAI, 2016). A condição de alagamento, inicia uma série de processos físicos, microbiológicos e químicos que afetam o crescimento e absorção de nutrientes por parte da planta e a disponibilidade e perda de nutrientes no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Uma destas mudanças está no pH do solo, que após o alagamento chega a valores entre 6,5 a 7,5 independentemente do pH original e estes valores permanecem enquanto a condição de alagamento for mantida. A neutralidade do pH evita a toxidez por alumínio, pois na medida que o pH aumenta a concentração de alumínio na solução do solo diminui até níveis não críticos (MEURER, 2012). Pelo contrário, no arroz de sequeiro, o solo está permanentemente em condições aeróbicas, dependendo predominantemente da água da chuva para manter a umidade e, sendo assim completamente exposto à toxidez por alumínio. Esta condição é agravada pelo fato dos solos em geral serem ácidos. Na Colômbia, o arroz é mantido com irrigação intermitente, e esta condição elimina os efeitos benéficos da lâmina de água que evita a toxidez de alumínio. A toxidez por alumínio também é um fator limitante em sistemas que preconizam a irrigação intermitente (*AWD Alternate Weeting and Drying System*) para aumentar a eficiência no uso da água e reduzir os gases de efeito estufa devido à falta de lâmina de água. Em consequência, conclui-se que a tolerância a toxidez de alumínio é essencial no arroz de sequeiro e no sistema de irrigação intermitente, e, portanto, apresenta uma grande importância como objetivo de melhoramento do arroz.

2.5 Aspectos fisiológicos da toxidez por alumínio

Foi determinado que o alumínio danifica as células do ápice radicular, inibindo a alongação das raízes, sendo por tanto reduzida a absorção de água e nutrientes, o qual limita o rendimento agrônômico (MA; RYAN; DELHAIZE, 2001). Nesses casos, a maior parte do alumínio se localiza na epiderme e no córtex (JONES et al., 2006).

Diferentes autores têm considerado o alongamento da raiz como o parâmetro morfológico mais sensível a toxicidade pelo alumínio em diversas espécies (CONTRERAS, 2013; MOUSTAKAS et al., 1992). Acredita-se que por mais que as raízes sejam a parte mais sensível à toxidez por alumínio, não deve ser apenas este

parâmetro usado para fazer a distinção dos níveis de sensibilidade das plantas de arroz ao excesso de alumínio (MACEDO; KINET; JAN, 1997). A avaliação das raízes é o parâmetro onde têm maior valor os dados de campo e das provas de adaptação dos genótipos (RAMAN; GUSTAFSON, 2011), e finalmente os parâmetros de tolerância a acidez e o rendimento de campo demonstram a produtividade de uma cultivar e sua posterior aceitação por parte dos agricultores; sendo estas avaliações fundamentais tanto para a obtenção de variedades, como para a definição de genitores para compor blocos de cruzamentos visando esta característica.

2.6 Absorção e transporte do alumínio nas plantas

Os mecanismos da tolerância internos, também conhecidos como mecanismos simplásticos, desintoxicam o sistema celular, uma vez o alumínio entra na célula (MA; RYAN; DELHAIZE, 2001). Isto ocorre principalmente em dois locais: No citoplasma, onde são formados complexos estáveis com ácidos orgânicos (tais como citrato, malato, oxalato), taninos (TAHARA et al., 2014) ou proteínas (MA; HIRADATE; MATSUMOTO, 1998; MA et al., 1997); e nas organelas, principalmente no vacúolo (WATANABE et al., 1998). Outro mecanismo de tolerância interno consiste em reparar rapidamente os danos causados pelo alumínio (incluindo os causados pelo estresse oxidativo) (DELHAIZE; MA; RYAN, 2012).

Estes mecanismos são frequentes em plantas que habitam áreas onde os solos ácidos são endêmicos (áreas tropicais e subtropicais) (METALI; SALIM; BURSLEM, 2012). Algumas espécies são capazes de acumular o alumínio em suas folhas sem apresentar sintomas adversos. Este é o caso do chá (*Camelia sinensis*), o trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) e a hortênsia (*Hydrangea macrophylla*) (MA; HIRADATE, 2000; TAKEDA; KUBOTA; YAGIOKA, 1985); em algumas espécies existe a coexistência de mecanismos de tolerância, por exemplo, em arroz, a exsudação de citrato (YOKOSHO; YAMAJI; MA, 2011) se combina com mecanismos simplásticos (HUANG et al., 2009) para desintoxicar plantas com excesso de alumínio.

Três modelos de resposta ao Al^{3+} são o limite de toxicidade, que pode ser explicado como o tempo e a quantidade da exposição ao alumínio que intervenha nos processos da planta dos quais depende o crescimento da raiz; hormese, entenda-se como o processo de estimulação de um período de atraso por baixas ou altas

concentrações de alumínio que sejam tóxicas para a planta; e limite de tolerância, aquele tempo de exposição a altas concentrações e tempos longos de alumínio no qual as plantas não apresentam nenhum efeito e pelo contrário exposições a concentrações curtas e baixas podem causar inibição no crescimento da raiz, estes três modelos tem relação conhecimento sobre os mecanismos de toxidez e resistência de alumínio (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002).

Conhecendo que a toxicidade pelo alumínio é um dos maiores limitantes para a produção das culturas e que o grau de toxicidade destes solos varia dependendo da espécie da planta, condições de crescimento, concentrações de alumínio e o tempo de exposição (DELHAIZE; RYAN, 1995) é que muitos trabalhos visam identificar genes com potencial uso em programas de fitomelhoramento e que correspondem aos mecanismos de tolerância tais como a desintoxicação interna e a exclusão do alumínio (CARREÑO; CHAPARRO-GIRALDO, 2013).

2.7 Melhoramento do arroz

O melhoramento genético vegetal é a arte e a ciência do homem manipular os fatores hereditários das plantas. No início da agricultura, o homem utilizou pela primeira vez o melhoramento de plantas quando começou a introduzir e selecionar as melhores plantas; assim a introdução e seleção foram os primeiros métodos de melhoramento genético (HALLAUER, 2011). Com a evolução do conhecimento, o homem foi capaz de selecionar plantas superiores, mais eficientes em produtividade, valor nutricional e reação aos estresses; mas que infelizmente esta seleção e o melhoramento moderno tem consigo a redução da variabilidade genética (MARTINEZ et al., 1998).

Embora tenha surgido a biotecnologia, a experiência e prática do fitomelhorista sempre será um fator decisivo na avaliação dos genótipos e na escolha dos melhores deles. Também é muito importante que o fitomelhorista tenha conhecimento sobre as áreas afins como botânica, genética, bioquímica, estatística, biologia celular e molecular, etc., mas também da cadeia produtiva do arroz para conhecer as necessidades da lavoura, da indústria, do mercado e do consumidor.

Com o desenvolvimento de técnicas em biotecnologia, as ferramentas para obter genótipos com maior rendimento e maior valor nutricional tiveram um aumento

com a chegada e utilização da manipulação dos DNAs recombinantes por meio da cultura *in vitro* de células e tecidos. Além de reduzir o tempo de obtenção de linhas puras e assim a obtenção de novas cultivares, relatando que com o avanço da ciência e o conhecimento da genética, o fitomelhoramento tornou-se menos arte e mais ciência. Outro auxílio que brinda a biotecnologia é a capacidade de caracterização molecular de cultivares e linhagens promissoras, pois assim se pode contar com uma segurança na identificação dos genótipos que são de grande importância como por exemplo espécies silvestres e cultivares tradicionais que se encontram *in situ* ou em bancos de germoplasma (MARTINEZ et al., 1998) os quais são muito importantes para não perder a variabilidade original da cultura.

Quando um programa de melhoramento planeja a obtenção de uma nova cultivar, fixa como objetivo a obtenção de características importantes como: o potencial de rendimento, a qualidade industrial, o tipo de grão, o ciclo de cultivo, tolerância a estresses bióticos como doenças e insetos, e abióticos como o clima (frio e calor), salinização, toxicidades por Fe ou Al (AZAMBUJA; VERNETTI JR; MAGALHÃES JR, 2004).

A pesquisa e o uso de genes de interesse têm demonstrado em linhagens transgênicas de cevada (*Hordeum vulgare L.*) transformadas como gene *taALMT1* de trigo, proporcionaram maior tolerância ao alumínio, maior eficiência na absorção de fósforo e aumento na produção de grãos comparada com linhas não transformadas em solos ácidos (DELHAIZE et al., 2009).

Diante do exposto e conhecendo a perspectiva mundial que o consumo tenda a aumentar pelo aumento na população, é necessário que a produtividade dos alimentos aumente (STEIN et al., 2018). Neste sentido, o melhoramento genético tem que utilizar os recursos genéticos vegetais pois estes são a maior fonte de genes para o melhoramento das culturas (MARTINEZ et al., 1998). Uma das respostas para ajudar a minimizar este problema na cultura do arroz, é melhorar sua adaptabilidade as mudanças climáticas e o aumento da sua habilidade de produzir bem mais nas diferentes regiões. As influências combinadas da natureza, da seleção humana, a diversificação edafoclimática e das práticas culturais permitem que se tenha uma ampla diversidade de ecótipos.

2.8 Novas técnicas de melhoramento

Estudos têm demonstrado que a tolerância ao alumínio é uma característica complexa que parece estar controlada por múltiplos genes, onde estes genes que aportam a tolerância ao alumínio foram identificados, devido a vários estudos genéticos e moleculares, sob condições controladas. Estes genes têm incluído a determinação das famílias *ALMT*, *MATE*, *ABC* e *NRAMP* em diferentes espécies, assim como fatores de correlação para diferentes culturas, sob situações de estresse e condições normais (MORENO, 2014).

Técnicas de seleção para a tolerância ao alumínio geralmente utilizam exposição de plântulas em diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva ou em solo, como avaliações posteriores de inibição de crescimento radicular (BASSAM; DAMBROTH; LOUGHMAN, 1990). Técnicas de avaliação empregadas em laboratório e em casa de vegetação são amplamente utilizadas na seleção de cultivares quanto a tolerância ao alumínio, o uso destas técnicas em programas de pesquisa ocorre devido à complexidade nas avaliações conduzidas diretamente a campo, especialmente para o sistema radicular. Além disso existe também o cultivo hidropônico (do grego: *hydro* = água e *ponos* = trabalho) o que significa trabalho com água, sem presença de solo (BELTRANO, J. GIMENEZ, 2015). Este método facilita a avaliação dos materiais de interesse tendo como vantagens a facilidade de avaliação das raízes, um melhor controle sobre os nutrientes e sobre as condições ambientais, agiliza o controle fitossanitário, a produção pode ser feita em qualquer época do ano, entre outras (BEZERRA NETO, E. BARRETO, 2012).

No âmbito biotecnológico, a compreensão da toxicidade pelo alumínio, mecanismos de tolerância em plantas e a identificação de genes envolvidos nestes, como *ALMT1*, *MATE*, *ALS3*, *Nrat1*, *STAR1* e *STAR2* (COLLINS et al., 2008; FURUKAWA et al., 2007; HOEKENGA et al., 2006; HUANG et al., 2009; LARSEN et al., 2005; LIGABA et al., 2006; LIU et al., 2009; MAGALHAES et al., 2007; MARON et al., 2013; XIA et al., 2010; YAMAJI et al., 2009; YANG et al., 2007); fatores de transcrição (*STOP1*, *ART1*); (*HOEKENGA* et al., 2006; *IUCHI* et al., 2007; *SAWAKI* et al., 2009; *YAMAJI* et al., 2009) e aqueles que participam na mitigação do estresse oxidativo (*WMn-SOD*, *MdSPDS1*, *NtAOX*) (*BASU*; *GOOD*; *TAYLOR*, 2001; *PANDA* et al., 2013; *WEN* et al., 2009); têm permitido avanços importantes na obtenção de plantas com maior tolerância ao alumínio.

**3 CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DE GENÓTIPOS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) EM
CONDIÇÕES CONTROLADAS DE HIDROPONIA SOB DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES DE ALUMÍNIO**

3.1 Introdução

O cultivo hidropônico oferece vantagens como ter condições controladas de solução nutritiva, luz e temperatura. Os elementos essenciais para o crescimento das plantas ficam disponíveis nas soluções nutritivas na sua forma iônica o qual permite uma fácil absorção pelas raízes; tanto no solo como na solução nutritiva, os elementos essenciais devem ter um equilíbrio para que dessa forma as plantas possam absorver e aproveitar cada um deles no seu metabolismo, a falta ou excesso de qualquer um dos elementos criará um desequilíbrio na planta e poderá sofrer transtornos no seu crescimento e desenvolvimento ou até levar ela à morte. O pH das soluções nutritivas é muito importante já que dele depende a absorção iônica dos nutrientes (BELDRANO; GIMENEZ, 2015).

Tendo em vista que entre genótipos (entre e dentro das espécies), pode-se encontrar diferenças na tolerância ao alumínio, torna-se interessante pensar na seleção e multiplicação de plantas que tenham a resistência ao estresse pelo alumínio como uma estratégia de melhoramento. Dessa maneira auxiliar na solução do problema que causa o estresse nos materiais vegetais.

Embora os estudos sobre a toxicidade pelo alumínio no sistema radicular do arroz sejam inúmeros, ainda não se tem muito claras as bases genéticas. Uma boa ferramenta para o estudo do estresse por alumínio em genótipos de arroz é o cultivo hidropônico o qual refere-se a cultura de plantas sem solo, ou seja, em solução nutritiva e onde as raízes das plantas ficam suspensas no meio líquido, ou substitutos do solo como areia grossa, vermiculita, turba, entre outros (BELDRANO; GIMENEZ, 2015).

Pela composição química da membrana plasmática é possível que esta seja pouco permeável as formas iônicas do alumínio, enquanto que os compostos de alumínio eletronicamente neutros ou os complexos de alumínio, como $Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$ ou $AlCl_3$ sejam não móveis. Além disso, a membrana plasmática pode ser atravessada pelo alumínio através dos poros hidrófilos ou pelos canais de proteína e assim chegar até o interior da célula (POSADA, 2001, 2002).

Embora as bases celulares e moleculares das diferenças da tolerância à toxicidade do alumínio ainda não estejam esclarecidas (LARSEN et al., 2004), sabe-se que a região do ápice radicular é o alvo primário da ação tóxica do alumínio e o principal local onde acontece a percepção da toxicidade por Al^{3+} convertendo-se num indicador de sensibilidade ao estresse por Al^{3+} , esta afirmação é sustentada pelas seguintes asseverações: a) no ápice radicular se encontram localizados mecanismos de resistência como a liberação de compostos orgânicos complexantes de Al^{3+} , b) a formação de calose como indicador da sensibilidade ao alumínio, ocorre em primeiro lugar nas células apicais da superfície externa da raiz (SIVAGURU et al., 2000).

Geralmente se encontra uma maior concentração de alumínio nas raízes das plantas que nos tecidos aéreos. A redução do crescimento radicular no comprimento (RYAN et al., 2011; VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB-NETO, 2002a) junto com o aumento do diâmetro das raízes são os primeiros sintomas notáveis pela toxicidade por Al^{3+} , esse efeito em plantas de *Triticum aestivum* começa uma hora após que as raízes são expostas ao Al^{3+} (POSADA; AVENDAÑO, 2007); e além, provoca uma diminuição considerável no volume das raízes laterais (RYAN; SHAFF; KOCHIAN, 1992).

As raízes que são prejudicadas pelo Al^{3+} exploram uma pequena proporção do solo diminuindo assim a sua capacidade para a absorção dos nutrientes e da água. Quando plantas de *Brassica oleracea* foram expostas à uma solução nutritiva com Al^{3+} , o efeito da toxicidade foi muito evidente nas raízes as quais apresentaram sintomas evidentes nos ápices radiculares, possivelmente devido a que sua permeabilidade celular é maior que nas outras regiões da raiz, pelo contrário nas folhas não se evidenciou nenhum tipo de sintoma de toxicidade por Al^{3+} (WAGATSUMA; KANEKO; HAYASAKA, 1987). Hoje em dia, tem-se considerado três os critérios para considerar a presença do Al^{3+} um problema no solo, o primeiro, o valor do Al^{3+} trocável supera os 2 meq; o segundo, a saturação de Al^{3+} na relação com os cátions trocáveis supera 25%; e o terceiro, a relação $(Ca+Mg+K)/Al$ é menor ou igual que um, em resposta a qualquer uma destas situações deve-se realizar necessariamente a implementação de corretivos com o fim de reduzir o efeito tóxico do Al^{3+} (POSADA; AVENDAÑO, 2007).

Algumas opções de corretivos são a aplicação do *mulch* (DUONG; DIEP, 1986), fertilizantes verdes (HUE; AMIEN, 1989), do ácido fúlvico que é um dos compostos que tem maior efetividade para reduzir a fitotoxicidade do Al^{3+} pela sua capacidade

para formar complexos com monômeros e polímeros do elemento (SUTHIPRADIT; EDWARDS, 1990), a aplicação de calcário ao solo, que graças aos carbonatos, óxidos, hidróxidos e silicatos de cálcio ou manganês neutralizam os íons H^+ na solução do solo, através dos íons OH^- , quando reage com a água do solo ($CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca + HCO_3^- + OH^-$). A função do calcário centra-se em incrementar o pH do solo ao converter o excesso de H^+ em H_2O . Além disso, com o aumento do pH do solo se induz a precipitação do alumínio como $Al(OH)_3$, que é um composto insolúvel (CUMMING; WEINSTEIN, 1990).

A adição de materiais orgânicos ao solo é de grande ajuda na correção da toxicidade pelo alumínio, pela capacidade para formar complexos estáveis alumínio-orgânicos que reduzem a fitotoxicidade do elemento. Esta prática agrícola, complementada com a inoculação das plantas com micorrizas e a calagem do solo, reduz substancialmente a possibilidade de estresse pelo alumínio para os vegetais (POSADA; AVENDAÑO, 2007).

Baseado no anteriormente descrito, fixa-se como objetivo avaliar a resposta de 22 genótipos de arroz (*O. sativa*) quanto à tolerância ao alumínio tóxico sob condições de hidroponia e quatro concentrações de alumínio, para identificar genótipos tolerantes visando a obtenção de genes de resistência.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido em sistema hidropônico sob condições de ambiente controlado, no Laboratório de Hidroponia, pertencente ao Centro de Genômica e Fitomelhoramento da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), no município de Capão do Leão - RS.

O delineamento experimental adotado foi em blocos completos ao acaso, em esquema bifatorial com três repetições. Cada repetição foi composta por cinco plantas. O primeiro fator de tratamento foi o genótipo de arroz com 22 níveis, sendo 17 linhagens elite da Colômbia e cinco cultivares comerciais do Brasil, quatro delas atuaram como testemunhas, Test1 e Test2 (sensíveis ao estresse por alumínio) e Test3 e Test4 (tolerantes ao estresse por alumínio) e os demais foram codificados de Gen1 a Gen18 (Tabela 1). O segundo fator de tratamento estabeleceu a concentração

de alumínio, 10, 20 e 30 mg L⁻¹ adicionados como Al₂(SO₄)₃ 16H₂O, além do controle, que foi a concentração 0 mg L⁻¹ de alumínio.

Tabela 1 - Genótipos avaliados e seus respectivos sistemas de plantio

Número	Nome/Genealogia	ID	Sistema
1	BR IRGA 409	Test1	Irrigado
2	BR IRGA 417	Test2	Irrigado
3	NIPPOMBARE	Test3	Irrigado
4	CICA 8	Test4	Irrigado
5	ATALANTA	Gen1	Irrigado
6	FNAL004-1-1-1-MA-1S	Gen2	Sequeiro
7	FNAL004-1-1-1-MA-2S	Gen3	Sequeiro
8	FB0007-3-1-6-1-M	Gen4	Irrigado
9	FL03188-7P-5-3P-1P-M	Gen5	Irrigado
10	FLV586-M-5-4-1S-MS	Gen6	Irrigado e sequeiro
11	FL8468-1P-2-3P-4P-3SR-MC	Gen7	Irrigado e sequeiro
12	FL11095-17-2-2-5SR-MA	Gen8	Irrigado e sequeiro
13	FL03174-8P-7-2P-2P-M	Gen9	Irrigado e sequeiro
14	CT10323-8-2-2P-1-1T-4P	Gen10	Irrigado e sequeiro
15	FNAL113-21-1-1-6A-3A	Gen11	Irrigado
16	FLL01359-5A-1S-2S-12A-MA	Gen12	Irrigado e sequeiro
17	LV473-1-11-2-1-M	Gen13	Irrigado e sequeiro
18	FA495-5-2-A2-1A-1A-8-M	Gen14	Irrigado e sequeiro
19	LV730-2-2-M-1T-33V	Gen15	Irrigado e sequeiro
20	FL11999-3P-2-3P-3P-M-2SR	Gen16	Irrigado e sequeiro
21	LV1063-7-3-MV	Gen17	Irrigado e sequeiro
22	FEDCLRC3-0099-10-1-2-ML	Gen18	Irrigado

As sementes de cada genótipo de arroz foram desinfestadas em álcool 70% por dois minutos, seguida de três lavagens com água destilada e posteriormente, 20 minutos em hipoclorito de sódio (1%), novamente com lavagem em água destilada, repetida por três vezes.

Depois deste processo de desinfestação, as sementes foram colocadas em papel de germinação (germitest®) com umidade mínima requerida para sua germinação dentro de caixas plásticas do tipo “gerbox”, sendo mantidas em câmara germinadora (BOD) a temperatura de 25°C, durante sete dias. As plantas foram selecionadas quanto ao vigor e uniformidade e logo transferidas para as telas de nylon colocadas e adaptadas nas tampas de vasos de 750 mL os quais continham a solução nutritiva. Os recipientes foram colocados no sistema hidropônico em condições

controladas, iluminação artificial com fotoperíodo de 16-8h (com intervalos dia e noite) e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

A solução nutritiva “controle” foi composta por: nitrato de cálcio - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (78,4 g L^{-1}), sulfato de magnésio - MgSO_4 (81,84 g L^{-1}), nitrato de potássio - KNO_3 (33,57 g L^{-1}), sulfato de amônio - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (4,77 g L^{-1}), potássio fosfato - KH_2PO_4 (11,29 g L^{-1}), ácido bórico - H_3BO_3 (5 mL), molibdato de sódio - Na_2MoO_4 (0,5 mL), cloreto de sódio - NaCl (5 mL), sulfato de zinco - ZnSO_4 (0,5 mL), sulfato de cobre - CuSO_4 (0,5 mL), sulfato de manganês - MnSO_4 (0,5 mL) e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na EDTA} - \text{Fe} + \text{EDTA}$ (43,25 mL) (CAMARGO; OLIVEIRA, 1981). Na solução de estresse, o $\text{Fe} - \text{EDTA}$ foi substituído por $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - \text{Fe}$ “Happy” (0,2405 g L^{-1}) e não foi utilizado o potássio fosfato - KH_2PO_4 , isto foi realizado para evitar uma possível precipitação do Al^{3+} . O pH foi ajustado em 4,0, utilizando NaOH ou HCl e posteriormente fixado com o reagente químico *MES monohydrate: 2-(N-Morpholino) ethanesulfonic acid hydrate*.

A solução nutritiva foi trocada aos sete dias para garantir que as concentrações dos nutrientes e de alumínio estivessem nas mesmas faixas próximas dos valores preestabelecidos. A perda de água por evaporação foi repostada diariamente com água destilada. O período de permanência das plântulas em solução nutritiva foi de 14 dias.

As avaliações realizadas foram comprimento da parte aérea, segunda e primeira folha, inserção da primeira e segunda folha, número de raízes, comprimento máximo do sistema radicular. As avaliações de comprimento foram realizadas com auxílio de régua graduada e os resultados expressos em centímetros. Também foi avaliada a massa da matéria seca de raiz e da parte aérea, para isso foi realizada a secagem do material vegetal em estufa a 50°C até atingir massa constante, com posterior pesagem das amostras em balança de precisão (Marte®).

Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk; à homocedasticidade pelo teste de Hartley; e, a independência dos resíduos por análise gráfica. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância através do teste F ($p \leq 0,05$). Constatando-se significância estatística, os efeitos dos genótipos foram comparados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e concentrações de alumínio por modelos de regressão ($p \leq 0,05$), conforme segue: $y = y_0 + ax$; $y = y_0 + ax + bx^2$, onde: y = variável resposta; y_0 = variável resposta correspondente ao ponto mínimo da curva; a = valor máximo estimado para a variável resposta; b = declividade da curva; x = concentração de alumínio (mg L^{-1}). A seleção do modelo foi baseada no baixo resíduo, baixo p -valor, e alto R^2 e R^2 adj.

Posteriormente, foi realizada a análise conjunta com todas as determinações, possibilitando comparar o efeito dos genótipos, das concentrações de alumínio e da interação entre eles, por análise multivariada com o uso do método de componentes principais. A análise de componentes principais (ACP) foi extraída a partir de uma matriz de correlação das variáveis dependentes. Dessa forma, a informação contida nas variáveis originais foi projetada em número menor de variáveis subjacentes chamadas de Componentes Principais (CPs). O critério para descarte de variáveis (CPs), utilizado foi recomendado por (JOLLIFFE, 2002), esse critério estabelece que se deve reter um número de componentes principais que contemple pelo menos, entre 70 e 90% da variação total. Após a seleção do número de CPs, foram obtidos os seus respectivos autovalores, com seus correspondentes autovetores. O procedimento gráfico adotado foi o *biplo*t, a partir dos escores e das cargas dos componentes principais selecionados. A presença de correlações entre as variáveis dependentes do estudo foi analisada através do coeficiente de correlação de Pearson (r).

3.3 Resultados e Discussão

Os pressupostos foram atendidos e evidenciaram não ser necessária a transformação dos dados para todas as variáveis respostas. Quanto ao comprimento da parte aérea ($F = 2,06$, $gl = 63$, $p = 0,0001$) foi verificada interação entre genótipo e concentração de alumínio (Tabela 2 e Figura 1 A). No controle (0 mg L^{-1}), os genótipos Test1, Test2, Gen5, Gen6 e do Gen14 ao Gen16 e Gen18 caracterizaram maiores comprimentos da parte aérea, diferindo dos demais. Entretanto, com 30 mg L^{-1} esse mesmo comportamento ocorreu para Test2, do Gen16 ao Gen18 (Tabela 2). Para os genótipos Test2 ($F = 5,7783$, $gl = 1$, $p = 0,0371$), Test3 ($F = 4,7285$, $gl = 1$, $p = 0,05$), Gen3 ($F = 14,3495$, $gl = 1$, $p = 0,0036$), Gen6 ($F = 15,8301$, $gl = 1$, $p = 0,05$), Gen8 ($F = 26,2165$, $gl = 1$, $p = 0,0361$), Gen9 ($F = 15,0040$, $gl = 1$, $p = 0,0031$), Gen13 ($F = 16,0517$, $gl = 1$, $p = 0,05$), Gen14 ($F = 46,0339$, $gl = 1$, $p = 0,021$), Gen15 ($F = 10,5551$, $gl = 1$, $p = 0,0087$) e Gen18 ($F = 5,2662$, $gl = 1$, $p = 0,04$) ajustaram-se modelos de regressão lineares. Entretanto, para Test1 ($F = 4,9574$, $gl = 2$, $p = 0,0354$), Test4 ($F = 2684,3760$, $gl = 2$, $p = 0,0136$), Gen1 ($F = 3,7894$, $gl = 2$, $p = 0,05$), Gen2 ($F = 13,0064$, $gl = 2$, $p = 0,0022$), Gen4 ($F = 43,2679$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen5 ($F = 10,7231$, $gl = 2$, $p = 0,0042$), Gen7 ($F = 6,7878$, $gl = 2$, $p = 0,0159$), Gen10 ($F = 21,8791$, $gl = 2$, $p =$

0,0003) e Gen12 ($F = 3,92$, $gl = 2$, $p = 0,05$) foram ajustados modelos de regressão polinomiais quadráticos. Para Gen11, Gen16 e Gen17 não foi possível ajustar modelos de regressão (Figura 1 A). Os maiores decréscimos do comprimento da parte aérea foram registrados para Gen4 (43,8%), Gen6 (39,7%) e Gen8 (34,2%) com o aumento da concentração de alumínio de zero para 30 mg L⁻¹. E os menores decréscimos ocorreram para Test1 (0,5%), Gen2 (0,6%) e Gen10 (1,8%), de zero para 10 mg L⁻¹.

Para o comprimento da segunda folha ($F = 1,93$, $gl = 63$, $p = 0,0004$) foi verificada interação entre genótipo e concentração de alumínio (Tabela 2 e Figura 1 B). Os maiores comprimentos da segunda folha no controle (0 mg L⁻¹) ocorreram para os genótipos Gen6 e Gen18; na concentração 10 mg L⁻¹ para Test4, Gen4, Gen11, Gen15 e Gen18; e 30 mg L⁻¹ para Test4, Gen14, Gen17 e Gen18 (Tabela 2). Para os genótipos Test1 ($F = 32,0985$, $gl = 1$, $p = 0,0298$), Gen2 ($F = 38,1305$, $gl = 1$, $p = 0,0252$), Gen3 ($F = 30,0582$, $gl = 1$, $p = 0,0317$), Gen5 ($F = 5,6116$, $gl = 1$, $p = 0,0394$), Gen8 ($F = 27,6795$, $gl = 1$, $p = 0,0343$), Gen9 ($F = 22,8271$, $gl = 1$, $p = 0,0411$), Gen10 ($F = 75,9278$, $gl = 1$, $p = 0,0129$), Gen12 ($F = 25,7454$, $gl = 1$, $p = 0,0367$), Gen13 ($F = 39,7229$, $gl = 1$, $p = 0,0243$), Gen15 ($F = 15,0293$, $gl = 1$, $p = 0,0031$) e Gen16 ($F = 35,0857$, $gl = 1$, $p = 0,0273$) ajustaram-se modelos de regressão lineares. Entretanto, para Test2 ($F = 7,8261$, $gl = 2$, $p = 0,0107$), Test3 ($F = 4,9998$, $gl = 2$, $p = 0,0347$), Gen4 ($F = 28,1732$, $gl = 2$, $p = 0,0001$), Gen6 ($F = 48,3178$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen7 ($F = 10,9671$, $gl = 2$, $p = 0,0039$), Gen14 ($F = 9,8581$, $gl = 2$, $p = 0,0054$) e Gen18 ($F = 27073$, $gl = 2$, $p = 0,0043$) foram ajustados modelos de regressão polinomiais quadráticos. Para Test4, Gen1, Gen11 e Gen17 não foi possível ajustar modelos de regressão (Figura 1 B). Somente foi apresentado acréscimo para o Gen4 (1,8%) em 10 mg L⁻¹, em relação a concentração inicial. Em todos os demais genótipos e em todas as concentrações quando comparadas com o controle, apresentaram-se decréscimos, e os maiores foram para Test2 com 46,6 e 48,4% e Gen6 com 57,4 e 66,1% nas concentrações 20 e 30 mg L⁻¹, respectivamente.

As folhas apresentam sintomas como amarelecimento pela interferência que cria o alumínio na biossíntese de clorofila, as folhas se tornam roxas nas bordas, atrofiamento pela deficiência de fósforo, enrolamento, etc., (BALDINO et al., 2010) e também sofrem uma redução no seu tamanho quando estão sob concentrações de Al³⁺ como foi demonstrado neste trabalho e é sustentado por outros autores que demonstraram que quando as concentrações de alumínio iam aumentando, se

apresentou redução nos comprimentos da parte aérea demonstrando que o alumínio afeta significativamente o crescimento foliar (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998). Isso acontece provavelmente porque a presença do alumínio na planta afeta a mobilidade dos outros elementos essenciais como o Ca, K e Mg que apresentam uma redução em seus teores conforme os teores de alumínio incrementam (OLIVEIRA; CAMARGO; SOUZA, 1983) o que produz deficiência destes elementos mostrando assim os sintomas por ausência dos mesmos.

Não somente na cultura de arroz se tem feito trabalhos deste tipo, em outras culturas como a soja, também houve diminuição no tamanho das folhas quando as plantas foram expostas a concentrações de alumínio (MASCARENHAS; CAMARGO; FALIVENE, 1984).

Tabela 2 - Comprimento da parte aérea (cm) e segunda folha (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Comprimento da parte aérea (cm)				Comprimento da segunda folha (cm)			
	Concentrações de alumínio (mg L ⁻¹)							
	0	10	20	30	0	10	20	30
Test1	18,15±0,75a ^{1/}	19,17±2,45a	15,72±0,92 c	13,33±0,63 c	8,35±0,28 c	8,06±0,47 c	6,39±0,58b	5,51±0,38c
Test2	20,51±0,26a	20,81±1,12a	16,15±1,83 b	17,17±1,34 a	11,10±2,02b	7,94±0,66 c	5,87±0,65b	6,10±0,24c
Test3	16,94±1,66b	17,90±1,25b	14,45±0,65 c	14,11±1,07 b	8,45±0,85 c	6,77±0,19 c	6,30±0,62b	7,74±0,31b
Test4	15,47±1,04b	17,98±0,42b	17,72±0,69b	14,85±0,70 b	11,18±0,65b	11,09±0,24 a	11,45±0,91a	9,47±0,38a
Gen1	15,95±1,51b	19,95±1,91a	17,11±0,69b	14,35±0,94 b	9,03±0,47 c	7,99±0,76 c	7,43±0,39b	7,94±0,54b
Gen2	16,68±0,42b	16,87±0,90b	14,95±0,58 c	12,57±0,80 c	11,10±0,61b	9,33±0,61 b	8,80±0,70b	7,77±0,23b
Gen3	17,09±1,43b	17,31±0,46b	13,47±0,59 c	12,71±1,01 c	12,54±0,87b	9,82±0,75 b	8,46±0,41b	7,57±1,08b
Gen4	15,89±0,84b	19,51±0,45a	19,11±0,40 a	12,20±0,74 c	11,15±0,66b	10,90±0,38 a	10,27±0,41a	6,93±0,11c
Gen5	18,56±1,44a	19,98±1,66a	19,99±0,50 a	13,25±0,57 c	11,86±0,39b	9,19±0,62 b	10,74±1,15a	8,21±0,60b
Gen6	20,77±0,54a	15,50±0,80b	14,07±1,59 c	12,56±0,41 c	15,18±0,30 a	9,44±0,69b	8,76±0,52b	8,15±0,25b
Gen7	14,74±0,33b	16,16±1,53b	14,04±0,38 c	11,56±0,83 c	9,42±0,31 c	7,77±0,47 c	7,53±0,33b	7,06±0,35c
Gen8	16,95±1,81b	14,79±0,74b	11,94±0,60 c	11,61±1,08 c	8,54±1,57 c	7,21±0,39 c	6,52±0,79b	6,13±0,63c
Gen9	16,40±0,53b	17,49±0,74b	12,69±1,08 c	12,14±0,49 c	10,77±0,67b	9,92±0,83b	7,75±0,75b	7,52±0,46b
Gen10	16,13±0,35b	16,20±0,31b	13,95±0,87 c	11,25±0,78 c	10,91±0,51b	9,07±0,75 b	8,37±0,43b	6,61±0,56c
Gen11	14,53±1,17b	19,10±0,94a	13,41±0,94 c	13,27±0,47 c	9,13±1,47 c	10,46±0,77 a	8,39±0,34b	7,13±0,34c
Gen12	13,27±1,42b	16,26±0,60b	12,08±1,23 c	10,73±0,56 c	7,95±0,65 c	7,86±0,50 c	6,96±0,24b	6,38±0,02c
Gen13	15,81±2,30b	15,81±1,10b	12,63±1,23 c	11,37±0,94 c	10,13±1,01 c	9,53±0,87 b	7,57±0,89b	6,89±0,90c
Gen14	18,80±1,51a	17,79±1,07b	15,07±0,64 c	14,13±0,50 b	11,48±0,31b	9,61±0,43b	7,75±0,95b	9,03±0,31a
Gen15	20,09±1,74a	19,97±0,95a	14,84±1,99 c	14,56±0,90 b	11,65±0,89b	10,83±0,51 a	7,45±0,28b	8,22±0,72b
Gen16	17,87±0,78a	18,84±0,02a	16,23±1,33 b	16,49±0,37 a	11,91±0,68b	9,92±1,04b	8,91±0,77b	8,18±0,86b
Gen17	15,01±1,29b	19,02±0,38a	14,28±1,85 c	15,79±0,95 a	10,15±1,09c	9,48±0,35b	7,67±0,82b	9,12±0,17a
Gen18	20,68±1,28a	19,45±0,26a	19,79±1,20 a	17,52±0,50 a	14,14±0,99 a	11,78±0,32 a	10,48±0,60a	10,18±0,42a

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio.

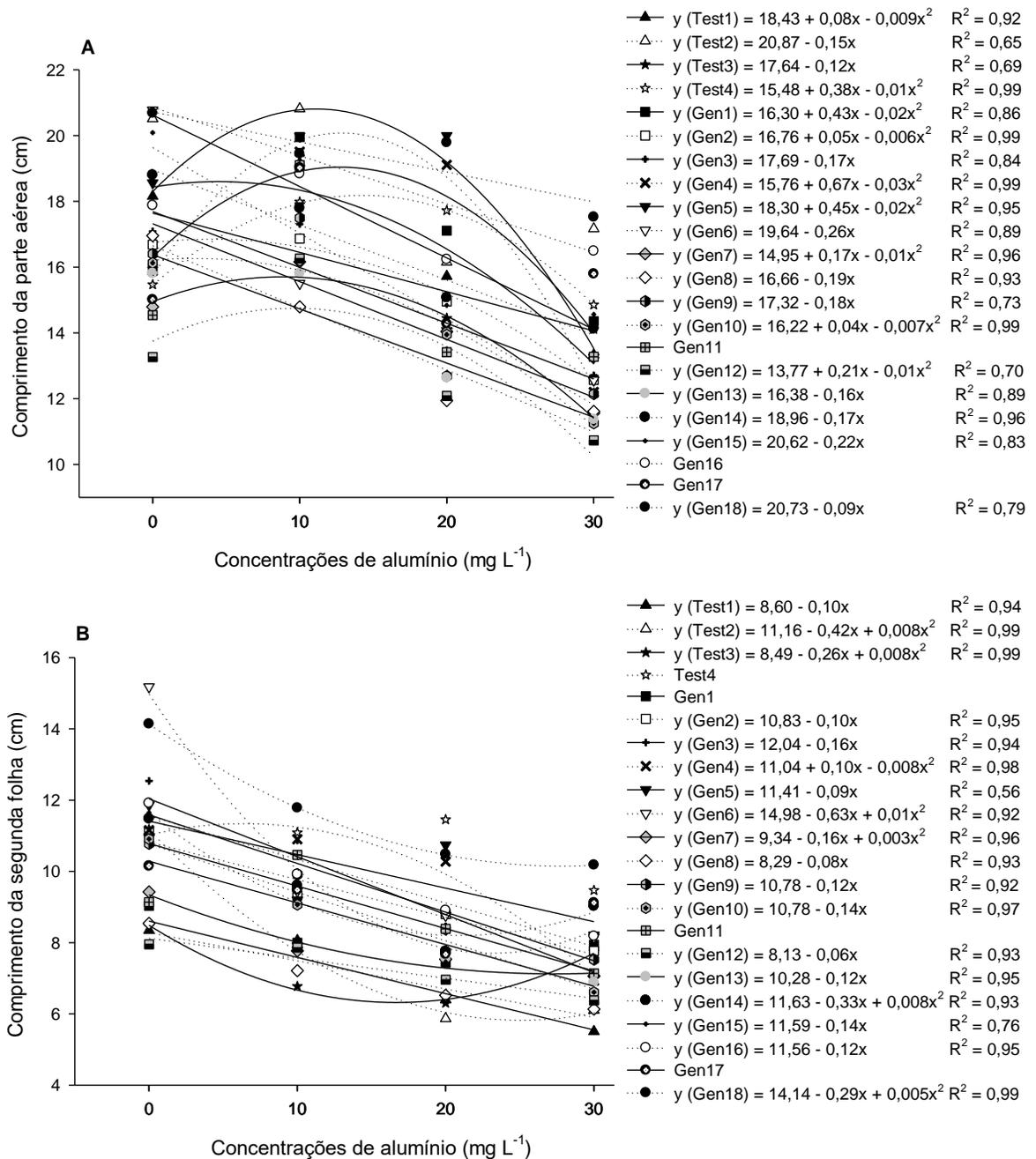


Figura 1 - Comprimento da parte aérea (cm) (A) e segunda folha (cm) (B) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Para o comprimento da primeira folha não ocorreu interação entre os fatores de tratamento ($F = 1,03$, $gl = 63$, $p = 0,4302$), porém foi verificada significância para os efeitos principais de genótipo ($F = 17,34$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) e concentração de alumínio ($F = 7,61$, $gl = 3$, $p < 0,0001$) (Tabela 3 e Figura 2 A). Os genótipos Test4, Gen6 e Gen13 foram os que apresentaram maior comprimento da primeira folha (Tabela 3). Para o efeito

da concentração de alumínio ajustou-se modelo de regressão linear ($F = 21,9741$, $gl = 1$, $p = 0,04$), com decréscimos de 2,9; 5,8; e, 8,7% para 10, 20 e 30 mg L⁻¹ respectivamente, quando foram comparadas com o controle (0 mg L⁻¹) (Figura 2 A).

Para o comprimento da inserção da primeira folha também não foi verificada interação entre os fatores de tratamento ($F = 1,29$, $gl = 63$, $p = 0,1026$), porém ocorreu significância para os efeitos principais de genótipo ($F = 9,98$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) e concentração de alumínio ($F = 16,29$, $gl = 3$, $p < 0,0001$) (Tabela 3 e Figura 2 B). Somente os genótipos Test4 e Gen18 obtiveram o maior comprimento da inserção da primeira folha (Tabela 3). Ajustou-se modelo de regressão linear ($F = 19,8639$, $gl = 1$, $p < 0,0001$), em que foram registrados decréscimos de 2,7; 5,5; e, 8,2% para 10, 20 e 30 mg L⁻¹ de alumínio, respectivamente, quando cada concentração foi comparada com zero mg L⁻¹ (Figura 2 B).

Para o comprimento da inserção da segunda folha não ocorreu interação entre os fatores de tratamento ($F = 1,36$, $gl = 63$, $p = 0,0625$), porém foi verificada significância para os efeitos principais de genótipo ($F = 9,32$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) e concentração de alumínio ($F = 41,38$, $gl = 3$, $p < 0,0001$) (Tabela 3 e Figura 2 C). O genótipo Gen18 diferiu dos demais, indicando o maior comprimento da inserção da segunda folha (Tabela 3). Ajustou-se modelo de regressão polinomial quadrático ($F = 23,2429$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), com acréscimos de 12,3% para 10 e 20 mg L⁻¹ de alumínio respectivamente, quando cada concentração foi comparada com o controle (0 mg L⁻¹) (Figura 2 C).

Para número de raízes ocorreu significância para os efeitos principais de genótipo ($F = 3,76$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) e concentração de alumínio ($F = 17,75$, $gl = 3$, $p < 0,0001$), não sendo registrada a interação entre esses fatores ($F = 0,64$, $gl = 63$, $p = 0,9785$) (Tabela 3 e Figura 2 D). Os genótipos Test1, Test2, Gen1, Gen7, Gen8, Gen9, Gen11, Gen14, Gen15, Gen16 e Gen17 diferiam dos demais, caracterizando os maiores números de raízes (Tabela 3). Ajustou-se modelo de regressão polinomial quadrático ($F = 20,2086$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), em que foram registrados acréscimos de 17,3; 23,1; e, 17,3% para 10, 20 e 30 mg L⁻¹ de alumínio, respectivamente quando cada concentração foi comparada ao controle (0 mg L⁻¹) (Figura 2 D).

Tabela 3 - Comprimento da primeira folha (cm), inserção da primeira e segunda folha (cm) e número de raízes para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Comprimento da primeira folha (cm)	Comprimento da inserção da primeira folha (cm)	Comprimento da inserção da segunda folha (cm)	Número de raízes
Test1	2,07±0,11e ^{1/}	2,92±0,11d	4,88±0,21 c	10,15±0,41 a
Test2	2,09±0,12e	3,08±0,13d	5,38±0,25 b	10,00±0,58 a
Test3	2,10±0,15e	3,02±0,11d	5,22±0,22 b	9,40±0,36 b
Test4	4,50±0,12a	4,17±0,14a	5,29±0,25 b	8,47±0,51 b
Gen1	2,41±0,07e	3,25±0,09c	5,10±0,22 c	10,72±0,44 a
Gen2	3,41±0,19c	3,32±0,08c	4,90±0,17 c	9,13±0,40 b
Gen3	3,26±0,11c	3,34±0,11c	4,86±0,24 c	8,68±0,39 b
Gen4	2,92±0,17d	3,33±0,18c	4,84±0,29 c	9,08±0,53 b
Gen5	3,31±0,21c	3,75±0,11b	5,71±0,29 b	9,20±0,40 b
Gen6	4,28±0,18a	3,92±0,18b	4,95±0,21 c	8,19±0,38 b
Gen7	3,16±0,28c	3,33±0,08c	4,79±0,24 c	11,48±0,64 a
Gen8	2,44±0,14e	3,03±0,16d	4,79±0,15 c	9,78±0,67 a
Gen9	3,49±0,23c	3,52±0,14c	4,60±0,20 c	10,27±0,38 a
Gen10	3,76±0,13b	3,44±0,13c	4,69±0,21 c	9,53±0,44 b
Gen11	3,90±0,23b	3,56±0,25c	4,49±0,28 d	10,71±0,56 a
Gen12	2,93±0,20d	2,91±0,07d	3,92±0,24 d	8,68±0,56 b
Gen13	4,14±0,24a	3,45±0,16c	4,31±0,22 d	9,52±0,41 b
Gen14	3,39±0,17c	3,62±0,15c	5,51±0,24 b	10,92±0,38 a
Gen15	3,37±0,18c	3,89±0,15b	5,54±0,27 b	10,15±0,53 a
Gen16	3,07±0,15c	3,25±0,10c	5,03±0,13 c	10,27±0,51 a
Gen17	3,27±0,10c	3,53±0,13c	5,03±0,26 c	9,78±0,44 a
Gen18	3,92±0,19b	4,36±0,16a	6,56±0,24 a	9,00±0,31 b

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos.

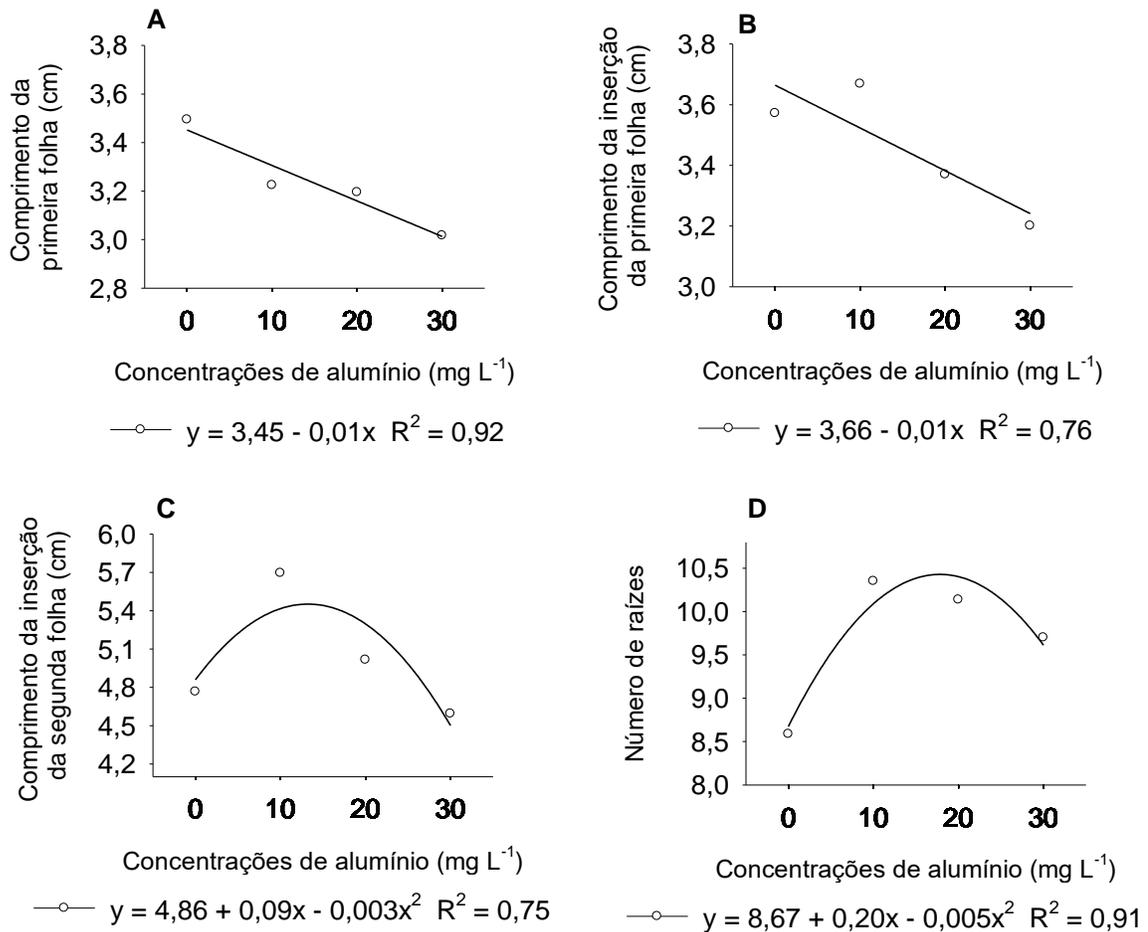


Figura 2 - Comprimento da primeira folha (cm) (A), inserção da primeira folha (cm) (B), inserção da segunda folha (cm) (C) e número de raízes (D) para a cultura do arroz em função das diferentes concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.

As raízes sob estresse de Al^{3+} apresentam como sintomas engrossamento e amarelecimento nas pontas, degeneradas, com ramificações secundárias e escuras pela oxidação de compostos fenólicos e sem pelos absorventes (BALDINO et al., 2010). Os resultados deste trabalho são similares à outros onde tampouco foram encontradas diferenças significativas para esta variável e que é justificado já que a aplicação do alumínio pode ter acontecido de forma tardia (20 dias após a germinação da semente) (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998) mas no presente trabalho a aplicação do Al^{3+} foi feita aos 7 dias após a germinação da semente, demonstrando assim que possivelmente esta variável não é suficiente para classificar os genótipos entre tolerantes e sensíveis.

Resultados similares foram encontrados na cultura da soja onde foi avaliado o efeito do alumínio nas ramificações secundárias das raízes e onde foi evidenciado uma redução no número de ramificações, com sintomas como descoloração e finalmente necróticas. O maior efeito causado pelo alumínio em este estudo foi a redução no tamanho e o engrossamento das raízes (MASCARENHAS; CAMARGO; FALIVENE, 1984).

Para comprimento máximo do sistema radicular ($F = 2,31$, $gl = 63$, $p < 0,0001$) foi verificada interação entre genótipo e concentração de alumínio (Tabela 4 e Figura 3 A). Para esta variável, no controle (0 mg L^{-1}) somente o genótipo Test3 destacou-se dos demais apresentando maior comprimento. Porém, com 20 mg L^{-1} os maiores comprimentos foram para Test1, Test2, Test4, Gen1, Gen4, Gen5, Gen12, Gen14 e Gen18; e, com 30 mg L^{-1} não ocorreram diferenças significativas entre os genótipos (Tabela 4). Para todos os genótipos, Test1 ($F = 67,2062$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Test2 ($F = 16,0572$, $gl = 2$, $p = 0,0011$), Test3 ($F = 228,2580$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Test4 ($F = 89,3562$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen1 ($F = 47,6411$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen2 ($F = 34,1114$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen3 ($F = 208,2508$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen4 ($F = 49,1812$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen5 ($F = 16,5553$, $gl = 2$, $p = 0,0010$), Gen6 ($F = 16,8521$, $gl = 2$, $p = 0,0014$), Gen7 ($F = 33,2766$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen8 ($F = 51,4776$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen9 ($F = 29,6569$, $gl = 2$, $p = 0,0001$), Gen10 ($F = 39,0274$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen11 ($F = 34,0619$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen12 ($F = 42,1024$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen13 ($F = 60,8762$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen14 ($F = 948,5089$, $gl = 2$, $p = 0,0230$), Gen15 ($F = 84,8617$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen16 ($F = 62,1739$, $gl = 2$, $p < 0,0001$), Gen17 ($F = 32,1563$, $gl = 2$, $p < 0,0001$) e Gen18 ($F = 24,1658$, $gl = 2$, $p = 0,0002$) foram ajustados modelos de regressão polinomiais quadráticos (Figura 3 A). Foram apresentados decréscimos para todos os genótipos em todas as concentrações testadas (10 , 20 e 30 mg L^{-1}) quando comparadas com zero mg L^{-1} , sendo os maiores decréscimos nos genótipos Gen6 (98,0%) e Gen9 (97,6%) na concentração de 20 mg L^{-1} , para os genótipos Gen6 (101,1%), Gen8 (97,0%) e Gen9 (107,8%) na concentração de 30 mg L^{-1} .

Pode-se observar nos resultados, que quando as concentrações de alumínio foram aumentando, as médias para o comprimento máximo do sistema radicular dos genótipos foram diminuindo significativamente, mostrando assim claramente o efeito negativo

causado pelo alumínio nas plantas. Este mesmo resultado foi reportado em outro trabalho onde foram avaliados diferentes genótipos, utilizando as mesmas concentrações utilizadas neste trabalho e onde encontraram que o Al^{3+} afetou significativamente o comprimento máximo (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998) e engrossamento radicular (MASCARENHAS; CAMARGO; FALIVENE, 1984). No caso da concentração mais alta (30 mg L^{-1}) não se apresentou diferença significativa entre os materiais, resultado similar com outro trabalho que não reportou diferença significativa na maior concentração avaliada (50 mg L^{-1}) (OLIVEIRA; CAMARGO; SOUZA, 1983).

A toxidez por Al^{3+} afeta a inibição da divisão celular, o que pode explicar a diminuição no crescimento da raiz (FOY, 1984; MARSCHNER, 1991) sendo essa a parte da planta que mais é afetada pela presença do Al^{3+} , fato que mostra que o alumínio é um elemento de pouca mobilidade na planta (JAN; PETTERSSON, 1989) e que não permite o normal desenvolvimento, afetando assim a absorção de água e nutrientes do solo (JAN; PETTERSSON, 1989) e a mobilidade dos outros elementos para a parte superior da planta. Em trabalhos com soja foi demonstrado que o comprimento da raiz foi reduzido drasticamente com a presença do Al^{3+} , o que demonstra que o alumínio causou restrição no crescimento das raízes (MASCARENHAS; CAMARGO; FALIVENE, 1984).

Para massa da matéria seca de raiz ($F = 1,45$, $gl = 63$, $p = 0,0325$) foi verificada interação entre genótipo e concentração de alumínio (Tabela 4 e Figura 3 B). Em 0 mg L^{-1} , os genótipos Teste2, Test3, Gen1, Gen2, Gen3, Gen5, Gen6, Gen10 e do Gen13 ao Gen18, diferiam dos demais. Nas concentrações de 10, 20 e 30 mg L^{-1} não foram verificadas diferenças significativas entre os genótipos (Tabela 4). Somente para Test1 ($F = 4,3249$, $gl = 2$, $p = 0,04$), Gen1 ($F = 4,8098$, $gl = 2$, $p = 0,038$) e Gen16 ($F = 4,0292$, $gl = 2$, $p = 0,05$) ajustaram-se modelos polinomiais quadráticos. Para os demais genótipos não foi possível ajustar modelos de regressão (Figura 3 B). Para o genótipo Test1 na concentração de 30 mg L^{-1} ocorreu decréscimo de 15%, porém em 10 e 20 mg L^{-1} foi registrado acréscimo de 25 e 20%, respectivamente quando comparadas a concentração inicial. Para os genótipos Gen1 e Gen16 foram verificados acréscimos em todas as concentrações

Tabela 4 - Comprimento máximo do sistema radicular (cm) e massa da matéria seca de raiz (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Comprimento máximo do sistema radicular (cm)				Massa da matéria seca de raiz (g)			
	Concentrações de alumínio (mg L ⁻¹)							
	0	10	20	30	0	10	20	30
Test1	7,46±0,10c ^{1/}	3,71±0,11c	2,91±0,16a	2,12±0,53a	0,018±0,001 b	0,026±0,001 a	0,022±0,001a	0,019±0,003a
Test2	8,11±0,35c	3,50±0,21b	3,89±0,95 a	1,76±0,41 a	0,023±0,002 a	0,028±0,001 a	0,016±0,005a	0,019±0,000a
Test3	11,32±0,25a	4,52±0,22a	2,72±0,05 b	2,40±0,28a	0,022±0,001 a	0,026±0,002 a	0,020±0,002a	0,025±0,000a
Test4	8,63±0,38b	4,21±0,51a	2,93±0,19 a	2,05±0,10a	0,014±0,001 b	0,021±0,002 a	0,018±0,002a	0,016±0,001a
Gen1	8,95±0,54b	3,99±0,31b	3,13±0,19 a	2,96±0,63a	0,019±0,002 a	0,027±0,003 a	0,027±0,002a	0,024±0,002a
Gen2	7,93±1,09c	3,09±0,07c	1,99±0,28 b	1,56±0,40a	0,019±0,002 a	0,024±0,004 a	0,026±0,005a	0,017±0,003a
Gen3	7,24±0,22c	3,22±0,18c	1,83±0,07 b	1,54±0,28a	0,020±0,002 a	0,024±0,003 a	0,025±0,002a	0,018±0,001a
Gen4	8,87±0,34b	4,74±0,37a	4,07±0,40 a	1,91±0,28a	0,018±0,000 b	0,025±0,002 a	0,019±0,003a	0,017±0,002a
Gen5	8,43±0,38b	4,77±0,64a	4,24±0,70 a	2,89±0,86a	0,022±0,002 a	0,025±0,004 a	0,028±0,001a	0,020±0,001a
Gen6	6,83±0,37c	1,57±0,27d	2,15±1,07 b	1,18±0,68a	0,019±0,003 a	0,014±0,001 a	0,018±0,005a	0,013±0,003a
Gen7	5,97±0,08c	1,50±0,31d	1,83±0,23 b	1,89±0,18a	0,014±0,002 b	0,022±0,003 a	0,019±0,002a	0,019±0,000a
Gen8	8,55±0,66b	3,24±0,18c	2,21±0,23 b	1,61±0,62a	0,018±0,002 b	0,023±0,000 a	0,019±0,001a	0,018±0,002a
Gen9	7,93±1,15c	2,85±0,08c	1,66±0,25 b	1,67±0,66a	0,018±0,003 b	0,024±0,003 a	0,020±0,003a	0,019±0,003a
Gen10	7,67±0,40c	2,55±0,21c	2,58±0,31 b	2,01±0,05a	0,020±0,001 a	0,026±0,004 a	0,022±0,004a	0,018±0,001a
Gen11	7,61±0,61c	2,90±0,08c	2,19±0,51 b	2,56±0,64a	0,014±0,001 b	0,025±0,000 a	0,018±0,003a	0,018±0,002a
Gen12	8,01±0,53c	3,64±0,47b	3,05±0,34 a	2,76±0,11a	0,015±0,002 b	0,021±0,003 a	0,020±0,001a	0,017±0,005a
Gen13	9,70±0,61b	2,55±0,36c	1,61±0,29 b	1,97±0,64a	0,023±0,003 a	0,025±0,003 a	0,018±0,003a	0,020±0,003a
Gen14	7,56±0,49c	4,36±0,67a	3,07±0,45 a	4,03±1,28a	0,022±0,003 a	0,032±0,002 a	0,021±0,003a	0,027±0,000a
Gen15	8,85±0,78b	3,99±0,27b	2,02±0,13 b	1,77±0,35a	0,023±0,001 a	0,023±0,003 a	0,015±0,001a	0,020±0,002a
Gen16	7,72±0,63c	3,65±0,23b	2,33±0,41 b	1,81±0,23a	0,020±0,000 a	0,028±0,000 a	0,023±0,001a	0,022±0,001a
Gen17	6,64±0,29c	3,29±0,03c	2,68±0,61 b	2,95±0,40a	0,023±0,002 a	0,027±0,001 a	0,020±0,000a	0,021±0,002a
Gen18	8,38±0,51b	4,82±0,30a	3,61±0,29 a	2,72±1,08a	0,023±0,002 a	0,026±0,003 a	0,025±0,001a	0,020±0,001a

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio.

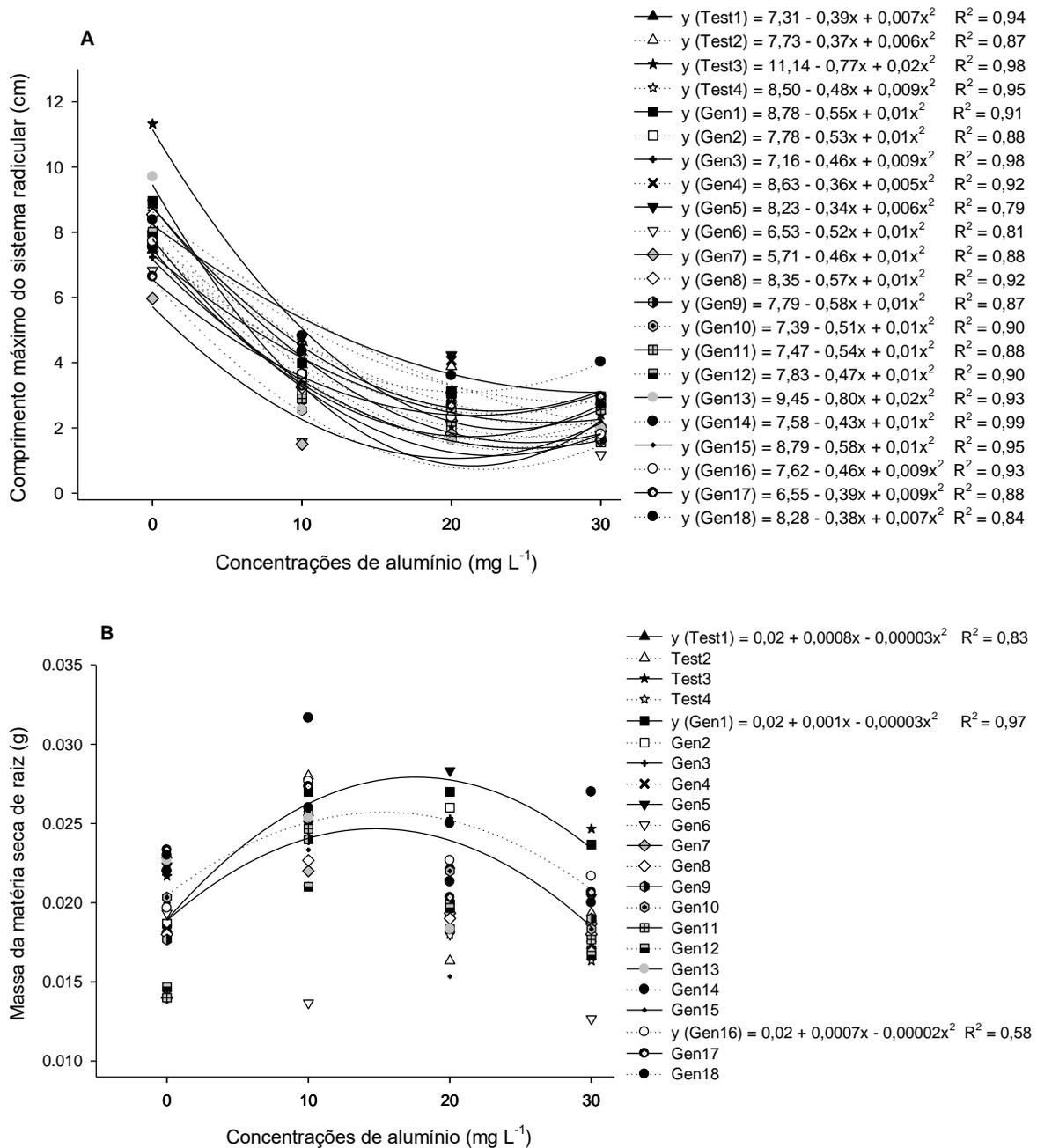


Figura 3 - Comprimento máximo do sistema radicular (cm) (A) e massa da matéria seca de raiz (g) (B) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.

testadas (10, 20 e 30 mg L^{-1}) quando comparadas com 0 de mg L^{-1} , sendo 35, 40 e 15% para o Gen1 e 25, 30 e 15% para o Gen16, respectivamente.

Em trabalhos reportados na literatura, encontrou-se que esta variável foi diminuída pelo efeito negativo do alumínio então pode-se concluir que esta variável foi independente do genótipo (VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB-NETO, 2002b). Em outros trabalhos reportados encontrou-se diferença significativa nas

mesmas concentrações avaliadas neste trabalho (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998) o que faz pensar que se deve ter em conta para uma possível e próxima avaliação para corroborar os dois resultados reportados; e quando comparadas a concentração 0 com a concentração 50 houve diferença entre os cultivares, apresentando-se redução na concentração 50, embora comparando com a concentração 10, em esta última concentração os genótipos apresentaram maiores pesos. Quando comparados os pesos da concentração 0 com a concentração 50 constatou-se que em alguns genótipos assim na concentração 50 as raízes foram mais curtas tiveram maior peso que na concentração 0. Outros genótipos apresentaram os resultados esperados, quando a concentração de alumínio vai incrementando, o peso radicular vai diminuindo (OLIVEIRA; CAMARGO; SOUZA, 1983). Em *Brachiaria decumbens* foi observado um aumento em quanto as concentrações de alumínio iam aumentando (MATINS et al., 2011).

Para massa da matéria seca da parte aérea foi registrada interação entre genótipo e concentração de alumínio ($F = 1,39$, $gl = 63$, $p = 0,04$) (Tabela 5 e Figura 4). Quando as plantas receberam 10 mg L^{-1} de alumínio não ocorreram diferenças entre os genótipos. Entretanto, com a concentração de 30 mg L^{-1} , as maiores massas da matéria seca da parte aérea foram para Test1, Test2, Test3, Gen1, Gen5 e do Gen14 ao Gen18 e estes diferiram dos demais genótipos testados (Tabela 5). Para os genótipos Test1 ($F = 5,7655$, $gl = 1$, $p = 0,03$), Test2 ($F = 5,0762$, $gl = 1$, $p = 0,04$), Gen2 ($F = 5,6287$, $gl = 1$, $p = 0,03$), Gen3 ($F = 110,0139$, $gl = 1$, $p = 0,009$), Gen8 ($F = 7,6081$, $gl = 1$, $p = 0,0202$), Gen13 ($F = 6,1185$, $gl = 1$, $p = 0,0329$), Gen16 ($F = 34,2392$, $gl = 1$, $p = 0,0280$) e Gen18 ($F = 9,3459$, $gl = 1$, $p = 0,0121$) ajustaram-se modelos de regressão lineares. Entretanto, para Test3 ($F = 6,0797$, $gl = 2$, $p = 0,0213$), Gen4 ($F = 621,0741$, $gl = 2$, $p = 0,0284$), Gen6 ($F = 4,3937$, $gl = 2$, $p = 0,05$), Gen9 ($F = 4,1407$, $gl = 2$, $p = 0,05$) e Gen15 ($F = 7,8522$, $gl = 2$, $p = 0,0106$) foram ajustados modelos de regressão polinomiais quadráticos. Para Test4, Gen1, Gen5, Gen7, Gen10, Gen11, Gen12, Gen14 e Gen17 não foi possível ajustar modelos de regressão (Figura 4). Os maiores decréscimos de massa da matéria seca da parte aérea foram registrados para Gen4 (51,5%), Gen15 (46,0%) e Test2 (34,9%) com o aumento da concentração de alumínio de 0 para 30 mg L^{-1} . Nessa mesma comparação, o Test3 apresentou acréscimo de 6,0%. Entretanto, de 0 para 10 mg L^{-1} de alumínio, o Gen4 caracterizou acréscimo de 3,7% na massa da matéria seca da parte aérea.

Na cultura de *Brachiaria ruziziensis* a massa seca da parte aérea foi afetada com o aumento das concentrações de alumínio (MATINS et al., 2011), resultado oposto foi obtido em outros trabalhos onde, embora o alumínio tenha maior mobilidade dentro da planta nesta espécie que na cultura do arroz e o acúmulo na parte aérea seja maior, não causou efeito negativo na parte aérea (MATINS et al., 2011), resultado similar foi obtido na cultura da soja (MASCARENHAS; CAMARGO; FALIVENE, 1984).

Tabela 5 - Massa da matéria seca da parte aérea (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Massa da matéria seca da parte aérea (g)			
	Concentrações de alumínio (mg L ⁻¹)			
	0	10	20	30
Test1	0,074±0,003b ^{1/}	0,080±0,006a	0,064±0,005 a	0,059±0,005 a
Test2	0,085±0,005a	0,085±0,002a	0,047±0,018 b	0,062±0,003 a
Test3	0,084±0,003a	0,074±0,002a	0,068±0,003 a	0,074±0,005 a
Test4	0,062±0,006b	0,069±0,008a	0,063±0,000 a	0,057±0,001 b
Gen1	0,077±0,002a	0,088±0,007a	0,077±0,004 a	0,066±0,007 a
Gen2	0,071±0,007b	0,068±0,007a	0,066±0,006 a	0,049±0,006 b
Gen3	0,073±0,005b	0,065±0,007a	0,060±0,006 a	0,055±0,005 b
Gen4	0,071±0,008b	0,077±0,003a	0,070±0,004 a	0,046±0,003 b
Gen5	0,086±0,006a	0,073±0,009a	0,074±0,007 a	0,065±0,015 a
Gen6	0,084±0,003a	0,057±0,011a	0,065±0,003 a	0,052±0,002 b
Gen7	0,062±0,001b	0,066±0,012a	0,062±0,004 a	0,055±0,004 b
Gen8	0,069±0,008b	0,061±0,006a	0,049±0,004 b	0,050±0,005 b
Gen9	0,063±0,003b	0,070±0,002a	0,053±0,005 b	0,052±0,001 b
Gen10	0,071±0,002b	0,073±0,008a	0,075±0,006 a	0,056±0,003 b
Gen11	0,057±0,009b	0,065±0,006a	0,049±0,005 b	0,046±0,003 b
Gen12	0,057±0,005b	0,062±0,004a	0,047±0,005 b	0,047±0,003 b
Gen13	0,068±0,007b	0,067±0,003a	0,055±0,004 b	0,055±0,005 b
Gen14	0,088±0,013a	0,078±0,006a	0,064±0,004 a	0,072±0,002 a
Gen15	0,085±0,006a	0,074±0,005a	0,049±0,006 a	0,060±0,002 a
Gen16	0,075±0,008b	0,074±0,004a	0,069±0,006 a	0,065±0,001 a
Gen17	0,069±0,006b	0,066±0,003a	0,054±0,005 b	0,059±0,006 a
Gen18	0,084±0,005a	0,072±0,003a	0,072±0,006 a	0,063±0,003 a

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio.

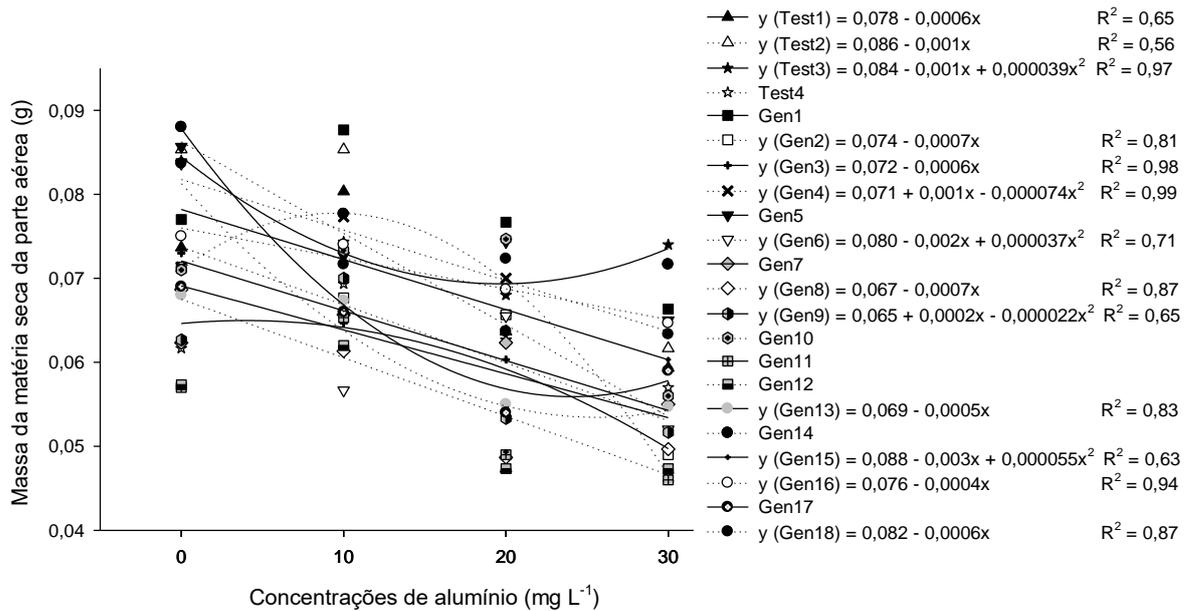


Figura 4 - Massa da matéria seca da parte aérea (g) para diferentes genótipos de arroz em função das concentrações de alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18.

De acordo com a regra de Jolliffe (2002) apenas os dois CPs foram utilizados nas análises por contemplarem 70% da variação para todas as comparações realizadas (Figura 5 A, B e C). Nos genótipos, o CP1 apresentou o maior autovalor, de 3,82 e representou 42,48% da variabilidade no conjunto de dados. O CP2 teve autovalor de 2,87 e foi responsável por 31,92% da variância nos dados. O restante dos CPs gerados produziu progressivamente autovalores menores e não explicaram de forma significativa a variabilidade dos dados. Os dois primeiros componentes principais explicaram 74,40% da variação total dos dados, possibilitando a plotagem dos escores e das cargas dos componentes referentes aos níveis do fator de tratamento estudado (genótipo) (Figura 5 A). Analisando os autovetores correspondentes ao CP1 destacou-se o comprimento da inserção da segunda folha (0,48) e parte aérea (0,45). No CP2, o comprimento da primeira folha (0,54) e inserção da primeira folha (0,43) também contribuíram para a diferenciação entre os genótipos.

Verificou-se a formação de um grande grupo composto pela maioria dos genótipos (Gen5, Gen14, Gen15, Gen16, Gen4, Gen17, Gen2, Gen10, Gen3, Gen13, Gen11, Gen9, Gen7, Gen8, Gen12, Gen1, Test3, Test2 e Test1) e dentro desse grande grupo quatro genótipos (Gen1, Test3, Test2 e Test1) foram semelhantes entre si. Os genótipos Gen18, Test4 e Gen6 caracterizaram comportamento distinto entre si e em relação ao grande grupo, em função das variáveis dependentes avaliadas, em

que o Gen18 foi responsável por maiores valores para comprimento da parte aérea (19,36 cm) e segunda folha (11,64 cm), enquanto que o Test4 (4,50 cm) obteve maior valor para comprimento da primeira folha, juntamente com o Gen6 (4,28 cm). Foram registradas correlações positivas entre comprimento da parte aérea com comprimento da segunda folha ($r = 0,49$, $p = 0,02$), comprimento da inserção da segunda folha ($r = 0,86$, $p < 0,0001$) e massa da matéria seca da parte aérea ($r = 0,71$, $p = 0,0002$).

Ao realizar a análise considerando o efeito das concentrações de alumínio, os dois primeiros componentes principais explicaram 99,17% da variação total, onde o CP1 foi responsável por 62,15% com autovalor de 5,59 e CP2 caracterizou 37,02% da diferenciação com autovalor menor (3,33) (Figura 5 B). As variáveis que foram determinantes para a separação das concentrações de alumínio com seus respectivos autovetores foram massa da matéria seca da parte aérea (0,42) e comprimento da segunda folha (0,41) para CP1, e massa da matéria seca de raiz (0,52), comprimento da inserção da segunda folha (0,50) e número de raízes (0,49) na CP2. As concentrações de alumínio (0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹) foram totalmente diferentes entre si, confirmando que as avaliações realizadas foram eficientes na separação das concentrações. A concentração zero foi detentora dos maiores valores médios para comprimento da primeira e segunda folha, de raiz e massa da matéria seca da parte aérea; e, a concentração de 10 mg L⁻¹ os maiores, para comprimento da parte aérea, inserção da primeira e segunda folha, número de raízes e massa da matéria seca de raiz.

Quanto ao efeito da interação entre genótipo e concentrações de alumínio, o CP1 foi responsável por 45,87% com autovalor de 4,13 e CP2 caracterizou 25,21% da diferenciação com autovalor menor (2,27), juntos responderam por 71,08% da variação total. As variáveis que contribuíram para a separação das interações foram comprimento da parte aérea (0,44), segunda folha (0,42) e massa da matéria seca da parte aérea (0,41) na CP1 e, massa da matéria seca de raiz (0,44) na CP2 (Figura 5 C). No grupo composto pela interação entre os genótipos e controle (0 mg L⁻¹), ocorreu também a presença dos genótipos Gen3 com 10 mg L⁻¹, Gen5 com 20 mg L⁻¹, Gen6 com 10 mg L⁻¹, Gen18 nas concentrações de 10, 20 e 30 mg L⁻¹ e Gen14 com 30 mg L⁻¹ de alumínio, demonstrando que esses genótipos se comportaram como tolerantes a esse elemento químico. Ainda nessa interação, o registro do genótipo Test4 nas concentrações de 10, 20 e 30 mg L⁻¹, confirmou a resposta já esperada, que esse genótipo apresenta tolerância ao alumínio.

O genótipo Gen18 nas concentrações de 10 (6,95 cm), 20 (6,92 cm) e 30 (6,46 cm) mg L⁻¹ caracterizou os maiores valores para o comprimento da inserção da segunda folha. Da mesma forma, para o comprimento da inserção da primeira folha os maiores valores foram para Gen6 com 0 (4,63 cm), Gen18 com 10 (4,60 cm), Gen18 com 0 (4,58 cm) e Test4 com 10 (4,51 cm) mg L⁻¹ de alumínio. Ainda nesse sentido, para o comprimento da parte aérea os maiores valores foram para Test2 com 10 (20,81 cm), Gen6 com 0 (20,77 cm), Gen18 com 0 (20,68 cm); e o comprimento da segunda folha para Gen6 com 0 (15,18 cm), Gen18 com 0 (14,14 cm) e Gen3 com 0 (12,54 cm) mg L⁻¹ de alumínio. Entretanto, para massa da matéria seca da raiz os maiores valores foram para Gen14 com 10 (0,032 g), Test2 com 10 (0,028 g), Gen16 com 10 (0,028 g); e, para massa da matéria seca da parte aérea, os maiores valores foram para Gen14 com 0 (0,088 g), Gen1 com 10 (0,088 g) e Gen5 com 0 (0,086 g) mg L⁻¹ de alumínio.

Foram registradas correlações positivas entre o comprimento da parte aérea com comprimento da segunda folha ($r = 0,66$, $p < 0,0001$), inserção da primeira folha ($r = 0,58$, $p < 0,0001$), inserção da segunda folha ($r = 0,80$, $p < 0,0001$), comprimento da raiz ($r = 0,45$, $p < 0,0001$), massa da matéria seca de raiz ($r = 0,53$, $p < 0,0001$), e massa da matéria seca da parte aérea ($r = 0,80$, $p < 0,0001$). Também, ocorreram outras correlações positivas de comprimento da segunda folha com comprimento da primeira folha ($r = 0,60$, $p < 0,0001$), inserção da primeira folha ($r = 0,80$, $p < 0,0001$), inserção da segunda folha ($r = 0,42$, $p < 0,0001$), comprimento de raiz ($r = 0,59$, $p < 0,0001$), e massa da matéria seca da parte aérea ($r = 0,59$, $p < 0,0001$); comprimento da primeira folha com inserção da primeira folha ($r = 0,68$, $p < 0,0001$); inserção da primeira folha com inserção da segunda folha ($r = 0,61$, $p < 0,0001$), massa da matéria seca da parte aérea ($r = 0,42$, $p < 0,0001$); inserção da segunda folha massa da matéria seca da parte aérea ($r = 0,59$, $p < 0,0001$); número de raízes com massa da matéria seca de raiz ($r = 0,45$, $p < 0,0001$). A única correlação negativa registrada foi entre número de raízes com comprimento de raiz ($r = -0,47$, $p < 0,0001$), demonstrando que geralmente quanto maior o número de raízes presente há redução do comprimento dessas raízes.

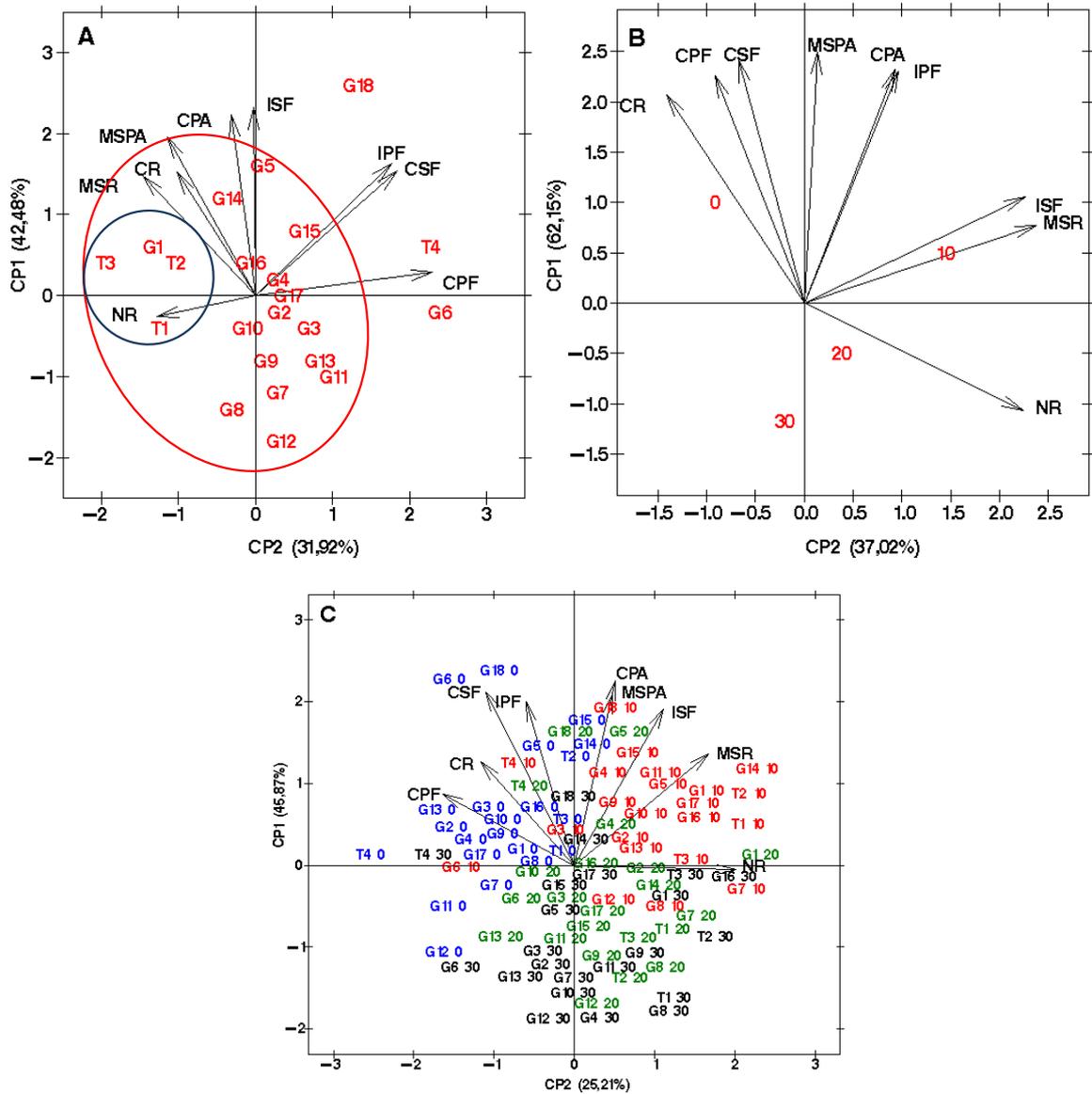


Figura 5 - Plotagem dos escores e das cargas dos CP1-CP2 referente as variáveis dependentes mostrando o comportamento dos genótipos (A), das concentrações de alumínio (0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹) (B), e da interação (C) entre os genótipos e as concentrações. CPA: comprimento da parte aérea; CPF: comprimento da primeira folha; CSF: comprimento da segunda folha; IPF: comprimento da inserção da primeira folha; ISF: comprimento da inserção da segunda folha; NR: número de raízes; CR: comprimento máximo do sistema radicular; MSR: massa da matéria seca de raiz; MSPA: massa da matéria seca da parte aérea.

3.4 Conclusões

Os genótipos Gen3 e Gen6 com 10 mg L⁻¹, Gen5 com 20 mg L⁻¹, Gen18 nas concentrações de 10, 20 e 30 mg L⁻¹ e Gen14 com 30 mg L⁻¹ de alumínio, comportam-se como tolerantes a esse elemento químico.

As variáveis comprimento da parte aérea e segunda folha, juntamente com a massa da matéria seca de raiz podem ser usadas para discriminar genótipos sensíveis e tolerantes ao estresse pelo alumínio, em períodos curtos de exposições.

**4 CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DE GENÓTIPOS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
QUANTO A TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO TÓXICO EM CASA DE VEGETAÇÃO**

4.1 Introdução

O alumínio é um metal leve que representa 7% da crosta terrestre (ISMAIL; THOMSON, 2011; ZHANG et al., 2007), ocorrendo sob a forma de óxidos e alumínio silicatos inofensivos. O alumínio se encontra em diferentes formas no solo, desde formas precipitadas até as formas monoméricas solúveis ($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})^{4-}$), quando o solo se torna ácido, $\text{pH} < 5,5$ (KINRAIDE; PARKER, 1990) o alumínio é solubilizado em formas tóxicas como $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, geralmente referido a Al^{3+} , que está presente em 40% das terras aráveis do mundo (ZHANG et al., 2007). A acidificação do solo pode ser desenvolvida naturalmente quando cátions básicos são lixiviados dos solos, mas pode ser acelerado por algumas práticas agrícolas e por chuvas ácidas (DELHAIZE; RYAN, 1995) como também pela degradação da matéria orgânica que reduz o pH do solo (CONCEIÇÃO; SERENO; NETO, 2008).

A espécie *Oryza sativa* L. é adaptada a solos ácidos, no entanto dentro da espécie existem variabilidades quanto a sensibilidade ao excesso de alumínio (FERREIRA; SALGADO; JORGE, 1986). Pequenas quantidades de alumínio em solução, parecem favorecer as plantas de arroz, mas a maioria dos cultivares são seriamente afetados por altas quantidades (FAGERIA, 1982). Concentrações baixas de alumínio em solução estimulam o crescimento radicular de alguns genótipos, em contrapartida concentrações relativamente altas podem resultar favoráveis para alguns outros genótipos (VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB-NETO, 2002).

A redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis tem sido considerada o principal efeito de níveis tóxicos do alumínio, quando o solo está em condição de acidez, o alumínio é liberado para o solo e este é absorvido pelas células da ponta da raiz parando o desenvolvimento da planta e afetando o alongamento e a divisão celular (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 2002; FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006; PANDA; BALUŠKA; MATSUMOTO, 2009). Um sistema radicular reduzido e danificado pode levar a deficiências minerais e estresse hídrico (ZHANG et al., 2007), as raízes apresentam formações curtas, grossas, amarronzadas e quebradiças, com ramificações finas e escassas; além destes sintomas nas raízes, nas folhas também aparecem sintomas semelhantes à deficiência de Ca^{2+} ou de Fe^{3+}

(CONCEIÇÃO; SERENO; NETO, 2008). Os mecanismos de tolerância podem se distinguir em dois grupos: um grupo daqueles que atuam no sentido de impedir a entrada do alumínio na raiz, onde estão inclusos os mecanismos de exsudação de compostos orgânicos que complexam o Al^{3+} , ligações ao Al^{3+} das raízes, contidos na mucilagem secretada pelas raízes, efluxo do Al^{3+} acumulado e alteração no pH da rizosfera e outro grupo aqueles que permitem a planta acumular o alumínio em locais específicos, onde estão envolvidos a fixação do Al^{3+} na parede celular, a complexação no simplasto via ligações orgânicas e o sequestro no vacúolo (CONCEIÇÃO; SERENO; NETO, 2008).

Existem quatro possíveis mecanismos fisiológicos para explicar as diferenças varietais quanto a tolerância ao alumínio (FAGERIA, 1982): 1) a facilidade da planta para absorver e empregar o P, Ca, Mg e K, quando a presença do alumínio é elevada (LEE, 1971), 2) quando os altos teores de ácidos orgânicos que estão presentes nos genótipos tolerantes ao alumínio, reagem com alumínio formando o complexo, e baixando assim o efeito tóxico (DAVIS; MCCAULEY; BYERS, 1971), 3) a capacidade que tem as plantas trocarem o pH da rizosfera e assim trocar a solubilidade do alumínio e 4) a capacidade diferencial das plantas poderem absorver e mobilizarem o alumínio (DAVIS; MCCAULEY; BYERS, 1971).

Em muitos casos são consideradas atividades culturais o uso de calcário agrícola ($CaCO_3 + MgCO_3$) no solo (HARTWIG et al., 2007), técnica considerada inviável no longo prazo, já que não permite manter os níveis de alumínio sempre na mesma faixa e sempre será corrigido somente a parte superficial do solo, além disso os custos dos corretivos e da sua utilização são muito altos (FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006).

Desta forma, uma das opções mais viáveis para melhorar problemas de toxidez do alumínio nas plantas, é o entendimento da natureza da herança do caráter (CONCEIÇÃO; SERENO; NETO, 2008) e conhecer e/ou entender quais são os mecanismos utilizados pelas plantas para tolerar o Al^{3+} , visando a exploração e utilização do potencial genético encontrado em algumas espécies, cultivares e/ou variedades, já que elas diferem na sua tolerância ao Al^{3+} no solo (FERREIRA; MOREIRA; RASSINI, 2006) para assim poder desenvolver pesquisas que apórtem diretamente na tolerância a diferentes estresses como por exemplo ao Al^{3+} .

Para que o fitomelhorista possa obter genótipos que aportem esse tipo de tolerâncias tem que conhecer muito bem a resposta e comportamento do material genético sob diferentes ambientes e/ou estresses; para isso é importante realizar uma boa descrição de características agronômicas e comerciais as quais são as que finalmente tem mais importância, pois são aquelas que interessa ao produtor (MUÑOZ; GIRALDO; DE SOTO, 1993).

Neste estudo são utilizadas linhagens elite nas quais o efeito de ambiente apresenta um papel muito importante na expressão do genótipo, sendo que se as condições ambientais mudam é possível que o fenótipo apresente variações que se expressam nas plantas (MUÑOZ; GIRALDO; DE SOTO, 1993).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar fenotipicamente o comportamento de 22 genótipos de arroz nas condições ambientais de casa de vegetação na região de Capão do Leão – RS, sob duas concentrações de alumínio, para identificar parâmetros morfológicos ligados a tolerância ao Al^{3+} .

4.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação na Estação Experimental de Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, no município de Capão do Leão - Rio Grande do Sul (RS), Brasil (31°48'15.49"S, 52°24'44.04"O e altitude de 16 m) de novembro de 2016 a abril de 2017. O clima da região conforme a classificação de Köppen e Geiger (1928) é do tipo Cfa, temperado úmido com verões quentes. Durante o período de execução do experimento, as condições ambientais da região foram temperatura média mínima de 17,4°C e máxima de 27,2°C, 82% de umidade relativa média e precipitação média de 58 mm (EMBRAPA, 2018).

Cada unidade experimental foi composta por vaso plástico com capacidade para 7,5 L, contendo solo coletado em Passo Fundo - RS e classificado como Latossolo Vermelho distrófico húmico, pertencente à unidade de mapeamento Passo Fundo (EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DO SOLO (CNPS), 2006). Antes da instalação do experimento o solo foi analisado quanto às características químicas e físicas no Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEl) (Tabela 1).

Tabela 1 - Características químicas e físicas da amostra de solo coletada em Passo Fundo - RS, antes da instalação do experimento

pH água 1:1	Ca ^{1/}	Mg ^{1/}	Al ^{1/}	H+Al	CTC _{efetiva}	CTC _{pH7}	K	Saturação (%)		Índice SMP
	-----cmol _c dm ⁻³ -----							Al	Bases	
4,2	0,3	0,1	3,5	17,3	4,1	17,9	0,19	85,4	3	4,8
M.O. (%)	Argila (%)	Classe de argila		S	P-Mehlich ^{2/}	K ^{2/}	Fe (%)			
----- m/v -----	-----	-----		-----	----- mg dm ⁻³ -----	-----	-----			
2,49	64	1		-	3,2	76	-			
Cu ^{2/}	Zn ^{2/}	B	Mn ^{1/}	Na ^{2/}	Relações molares					
-----mg dm ⁻³ -----					Ca/Mg	Ca/K	Mg/K			
-	-	-	-	3	3,00	1,58	0,53			

Argila determinada pelo método do densímetro. M.O.: matéria orgânica por digestão úmida. ^{1/} Extrator KCl 1,0 mol L⁻¹. ^{2/} Extrator Mehlich I.

O delineamento experimental adotado foi em blocos completos ao acaso, em esquema bifatorial com três repetições. O primeiro fator de tratamento foi composto pelo genótipo de arroz com 22 níveis, sendo 17 linhas elite da Colômbia e cinco cultivares comerciais do Brasil, quatro deles atuaram como testemunhas, Test1 e Test2 (como sensíveis ao estresse por alumínio) e Test3 e Test4 (como tolerantes ao estresse por alumínio) e os demais foram codificados de Gen1 a Gen18. O segundo fator de tratamento estabeleceu a concentração de Al³⁺, 0 (controle, sem a presença de Al³⁺) e 3,5 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺.

O solo foi coletado em Passo Fundo - RS por apresentar elevado teor de Al³⁺ e ser capaz de garantir a toxidez desejável a esse elemento químico, estabelecendo assim o nível de 3,5 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺ (Tabela 1). Para implementar nível controle (0 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺), após a realização da análise do solo, este foi dividido em duas partes, deixando assim uma metade do solo com a concentração original de alumínio e na outra metade do solo foi feita a calagem com 12,34 g de calcário por unidade experimental para garantir a dose zero.

Foram distribuídas 10 sementes em cada recipiente e, após a emergência das plantas, foi procedido o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Quanto a irrigação, inicialmente o solo foi umedecido à capacidade de campo para a germinação, e com aproximadamente quinze dias após a emergência, as plantas foram mantidas com uma lâmina de água permanente. As plantas foram adubadas conforme as recomendações da cultura do arroz com base nos resultados da análise

de solo (Tabela 1) e os demais manejos também foram realizados segundo as recomendações da cultura (SOSBAI, 2016).

Quando o arroz se encontrava entre os estádios de 5 e 10 dias, na época da emergência foi avaliado o vigor das plântulas segundo a escala proposta pelo Instituto Internacional para a Pesquisa em Arroz (INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE (IRRI)) (2002).

A partir dos 15 dias após a emergência, quando se dá o início do afilhamento, foram realizadas semanalmente durante quatro semanas as seguintes avaliações: altura de plântula, medida com regra graduada da base da plântula ao topo da folha mais alta e os valores foram expressos em cm; número de afilhos e folhas/afilho. A área foliar afetada por amarelecimento, clorose e senescência; número de folhas e afilhos mortos por amarelecimento, clorose e senescência foram quantificados segundo a escala estabelecido pelo IRRI (2002). Para a realização dessas avaliações adotou-se o mesmo delineamento e número de repetições, porém foram executadas em esquema trifatorial. Os fatores de tratamento genótipo e concentrações de Al^{3+} foram testados nos mesmos níveis descritos anteriormente e, o terceiro fator de tratamento, foi a época de avaliação (15, 23, 30 e 38 dias após emergência).

Também foram realizadas avaliações no final do ciclo, iniciando pelo florescimento, onde foi registrada a data, na qual 80% das plântulas estavam floridas, esta data se refere ao número de dias do plantio efetivo à data da floração plena.

No estágio de maturação, que faz referência a data em que 80% dos grãos nas panículas estão completamente maduros, ou seja, número de dias do plantio efetivo à maturação. Nesse estágio foi feita a avaliação da data de maturação, além das seguintes variáveis: comprimento e largura da folha bandeira (cm); comprimento do colmo (cm); número de colmos por planta; percentual de fertilidade da espiguetas; exerceção da panícula; comprimento da panícula (cm); número de panícula por planta; número de grãos por panícula; arista; degrane; índice de colheita (IC), massa de 100 grãos e raiz (g). As avaliações de exerceção da panícula, arista e degrane foram realizadas segundo a escala do IRRI (2002). O IC foi determinado a partir da equação: $IC = \text{massa seca dos grãos} / \text{massa seca total da planta}$.

Para as determinações de número de grãos por panícula, IC e massa de 100 grãos e de raiz, foi feita a coleta individual de cada uma das três plantas contidas em cada um dos recipientes. As plantas foram coletadas inteiras, de forma manual e procedeu-se a separação das raízes, parte aérea e panículas. Primeiro foram

coletadas as panículas, sendo três panículas empacotadas individualmente em sacos de papel e destinadas as avaliações de contagem e massa de 100 grãos. Na sequência, a parte aérea foi coletada totalmente desde a base do colmo. Para realizar as análises de contagem e massa, as amostras acondicionadas em sacos de papel, devidamente identificadas, foram levadas para o laboratório para secagem em estufa de ventilação forçada à temperatura de 60°C até ponto de equilíbrio constante. A massa de 100 grãos foi avaliada pela pesagem de 100 grãos, com 13% de base úmida.

As raízes também foram avaliadas individualmente e para isso primeiro foram lavadas com água corrente para remover o solo e analisadas com o programa Root Estimator for Shovelomics Traits (REST), o qual indicou os valores do ângulo de abertura (°), área (cm²), largura máxima (cm), comprimento (cm) e profundidade de largura máxima (cm) da raiz. Para verificação da massa de raiz, as amostras foram submetidas a secagem em estufa de ventilação forçada à temperatura de 50°C até ponto de equilíbrio constante e os resultados expressos em gramas. Além disso, antes da realização dessas avaliações as raízes foram fotografadas para visualização do efeito do Al³⁺.

Foram avaliadas as doenças no final do ciclo vegetativo, que são importantes na cultura do arroz tanto no Brasil quanto na Colômbia e limitantes para alta produtividade e qualidade do grão do arroz segundo a escala do IRRI (2002) (Tabela 2).

Os dados obtidos foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro Wilk; à homocedasticidade pelo teste de Hartley; e testada a independência dos resíduos por análise gráfica. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância através do teste F ($p \leq 0,05$). Constatando-se significância estatística, os efeitos dos genótipos foram comparados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), das concentrações de alumínio pelo teste t ($p \leq 0,05$) e das épocas de avaliação por modelos de regressão ($p \leq 0,05$), conforme segue: $y = y_0 + ax$; $y = y_0 + ax + bx^2$; $y = y_0 + a/x$, onde: y = variável resposta; y_0 = variável resposta correspondente ao ponto mínimo da curva; a = valor máximo estimado para a variável resposta; b = declividade da curva; x = época de avaliação (dias). A seleção do modelo foi baseada no baixo resíduo, baixo p -valor, e alto R^2 e R^2 adj.

Tabela 2 - Agentes causais e nomes das doenças avaliadas

Agente causal de doença	Nome comum
Fungos	
<i>Helminthosporium oryzae</i>	Folha e pescoço
<i>Pyricularia oryzae</i> (teleomorfo: <i>Magnaphorte oryzae</i>)	Brusone do pescoço e da folha
<i>Sarocladium oryzae</i>	Podridão da bainha ou Podridão do colar
<i>Gerlachia oryzae</i>	Escaldadura da folha
<i>Rhizoctonia solani</i> (teleomorfo: <i>Thanatephorus cucumeris</i>)	Queima das bainhas
<i>Bipolaris sp.</i> , <i>P. oryzae</i> , <i>Phoma spp.</i> , <i>Nigrospora sp.</i> , <i>Epicocum spp.</i> , <i>Curvularia lunata</i> , <i>Fusarium sp.</i>	Mancha de grãos, Mancha de glumas
<i>Cercospora oryzae</i> (teleomorfo: <i>Sphaerulina oryzina</i>)	Mancha estreita
<i>Gaeumannomyces graminis var. graminis</i>	Mal do pé
<i>Trichoconiella padwickii</i>	Mancha de alternaria
Bactéria	
<i>Burkholderia spp.</i>	Podridão marrom das bainhas
Virus	
Virus da folha branca	Virus da folha branca

Fonte: (NUNES, 2014)

Posteriormente, foi realizada a análise conjunta com 25 determinações (vigor aos 15 dias após emergência; altura de plântula, número de afilhos e folhas/afilho aos 38 dias após emergência; duração da floração e maturação, comprimento e largura da folha bandeira, comprimento do colmo, número de colmos por planta, percentual de fertilidade da espiguetta, exercício e comprimento da panícula, número de panícula por planta, número de grãos por panícula, arista, degrane, índice de colheita e massa de 100 grãos; descritores da raiz: ângulo de abertura, área, largura máxima, comprimento, profundidade de largura máxima e massa de raiz), possibilitando comparar o efeito dos genótipos sem e com Al⁺³ e da interação entre genótipo e concentrações de alumínio por análise multivariada, com o uso do método de componentes principais.

A análise de componentes principais (ACP) foi extraída a partir de uma matriz de correlação das variáveis dependentes. Dessa forma, a informação contida nas variáveis originais foi projetada em número menor de variáveis subjacentes chamadas de Componentes Principais (CPs). O critério para descarte de variáveis (CPs), utilizado foi recomendado por (JOLLIFFE, 2002), esse critério estabelece que se deve reter um número de componentes principais que contemple, pelo menos, entre 70 e 90% da variação total. Após a seleção do número de CPs, foram obtidos os seus respectivos autovalores, com seus correspondentes autovetores. O procedimento

gráfico adotado foi o *biplot*, a partir dos escores e das cargas dos componentes principais selecionados.

4.3 Resultados e discussão

Os testes de normalidade, homocedasticidade e a independência do resíduo foram atendidos e evidenciaram não ser necessária a transformação dos dados para todas as variáveis respostas. Quanto ao vigor, foi verificada interação entre os fatores de tratamento genótipo e concentrações de alumínio ($F = 1,86$, $gl = 20$, $p = 0,0294$), em que os genótipos não diferiram entre si na concentração de $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} . Porém, na concentração de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , os maiores vigores foram observados nos genótipos Test2, Test4, Gen2, Gen5, Gen8, Gen10, Gen11 e Gen12. Somente foram verificadas diferenças entre as concentrações de alumínio nos genótipos Gen1 e Gen15 (Tabela 3).

Este comportamento registrado quanto ao vigor das plantas pode ser possivelmente explicado pelo fato de que o vigor pode ser afetado pela germinação, a qual, por sua vez depende da qualidade inicial da semente; mas não somente isto, explica os resultados obtidos neste trabalho; outros tipos de problemas podem afetar a germinação, como a umidade do solo, a temperatura ou o estresse por alumínio, os quais não permitem um ótimo desenvolvimento fisiológico da semente apresentando assim, atraso na germinação e como consequência baixo vigor das plantas ou até chegar numa completa inviabilidade das sementes. Para corroborar com esses resultados, a literatura reporta a avaliação da germinação das sementes de Trigo (*Triticum aestivum* L.) onde encontraram que a germinação não foi tão afetada pelo Al^{3+} como foi o crescimento inicial das plantas (DE LIMA; COPELAND, 1990); outro trabalho também avaliando sementes de trigo em diferentes concentrações de Al^{3+} , sob condições de câmara de crescimento, demonstrou que a germinação das sementes também foi afetada pela presença do Al^{3+} e o efeito negativo foi aumentado conforme aumentou-se a concentração de Al^{3+} (ALAMGIR; AKHTER, 2009).

Para as variáveis de altura de plântula, número de afilhos e folhas por afilhos somente ocorreram interações duplas entre genótipo com concentrações de alumínio (Tabela 3) e concentrações de alumínio com época de avaliação (Figura 1). Para a

altura de plântula, considerando a interação entre genótipo e concentrações de alumínio ($F = 9,55$, $gl = 21$, $p < 0,0001$), os genótipos não apresentaram diferenças significativas entre si, na concentração de $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} . Entretanto, na presença de Al^{3+} ($3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), as menores alturas de plântulas foram verificadas para os genótipos Gen2, Gen3, Gen5, Gen10, Gen11, Gen13 e Gen16, que diferiram dos demais. Na comparação entre as concentrações de alumínio, não foram registradas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para os genótipos Test2, Test4, Gen4, Gen7, Gen9, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 (Tabela 3).

Quanto a outra interação dupla (concentrações de alumínio e época de avaliação), foram observadas diferenças significativas para a altura de plântula entre o controle e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , em todas as avaliações. Para a comparação das épocas, ajustaram-se adequadamente modelos lineares inversos de primeira ordem tanto para o controle ($F = 186,7794$, $gl = 1$, $p = 0,0053$) quanto para concentração de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} ($F = 331,7132$, $gl = 1$, $p = 0,003$). Sem Al^{3+} , da época inicial (15 dias) para 23, 30 e 38 dias, ocorreram acréscimos nas alturas de plântulas que ultrapassaram 150%. Entretanto, na presença de Al^{3+} , os acréscimos na altura de plântula foram menores, de 80, 115 e 139% respectivamente para 23, 30 e 38 dias, em relação aos 15 dias (Figura 1 A).

Estes resultados corroboram com os dados obtidos em diferentes trabalhos, onde a variável altura de planta foi afetada significativamente na presença do Al^{3+} , (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998a), mas é provável que aqueles genótipos que foram superiores tenham esse comportamento, já que possivelmente contam com o mecanismo que possibilita assimilar metabolicamente pequenas quantidades de Al^{3+} para ter um melhor desenvolvimento da planta (SILVA et al., 2011; TAIZ, L.; ZIEGLER, 2004) o qual pode ter acontecido no caso dos genótipos Gen7, Gen18, Test2 e Gen14.

Para o número de afilhos, considerando a interação entre genótipo e concentrações de alumínio ($F = 7,56$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) não ocorreram diferenças significativas entre os genótipos para o controle ($0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+}). No entanto, na presença do Al^{3+} , o maior número de afilhos foi verificado no genótipo Gen18, que diferiu dos demais. Foram registradas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para os genótipos Test1, Test3, Gen1, Gen2, Gen3, Gen5, Gen6, Gen10, Gen11, Gen12, Gen13 e Gen17 (Tabela 3). Quanto a outra interação dupla (concentrações de alumínio e época de avaliação) para o número de afilhos ocorreram

diferenças significativas entre 0 e 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} nas avaliações realizadas aos 23, 30 e 38 dias. Na comparação das épocas, ajustaram-se modelos de regressão linear para o controle ($F = 27,7776$, $gl = 1$, $p = 0,0342$) e 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} ($F = 613,1556$, $gl = 1$, $p = 0,0016$). Sem Al^{3+} , de 23 para 30 dias foi registrado acréscimo de 55% no número de afilhos. Enquanto que na presença de Al^{3+} , o acréscimo (47%) foi inferior para a mesma comparação (Figura 1 B).

Os resultados obtidos neste trabalho são similares a outros já reportados na literatura onde foram testados genótipos de arroz sob estresse por Al^{3+} e constatado o efeito negativo sobre a formação de afilhos (MORENO-ALVARADO et al., 2017). Estudo com as espécies *Brachiaria decumbens* e *Cenchrus ciliaries* indicaram que elas são afetadas negativamente reduzindo o afilhamento na presença do Al^{3+} (FERNANDES; ROSSIELLO; ARRUDA, 1984), resultados contrários foram observados na cultura do arroz onde estes não tiveram seus desempenhos afetados pelo Al^{3+} (FREIRE et al., 1987). Tendo em conta que de cada um dos afilhos ao final do ciclo da cultura produz uma panícula, o fato do Al^{3+} afetar o desenvolvimento do número de afilhos faz que o número de panículas seja baixo e o efeito disto é que o rendimento também vai ser afetado. Por isso pode ser entendido que um estresse no início do ciclo da planta, como a falta de emissão de afilhos pode afetar o rendimento final.

Na interação entre genótipo e concentrações de alumínio para número de folhas/afilhos ($F = 2,53$, $gl = 21$, $p = 0,0003$) não ocorreram diferenças significativas entre os genótipos para o controle (0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+}). Já, na presença de Al^{3+} (3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), os maiores valores ocorreram para Gen10 e Gen11. Na comparação entre 0 e 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} , foram verificadas diferenças significativas entre Gen3, Gen9, Gen10, Gen11, Gen12, Gen13 e Gen15 (Tabela 3). Para a outra interação dupla (concentrações de alumínio e época de avaliação) ocorreram diferenças significativas entre 0 e 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} nas avaliações realizadas aos 23, 30 e 38 dias. Na comparação das épocas, ajustou-se modelo de regressão polinomial quadrático para o controle ($F = 15,7982$, $gl = 2$, $p < 0,0001$) e linear para 3,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Al^{3+} ($F = 111,7440$, $gl = 1$, $p = 0,0088$). Sem Al^{3+} , quando as plantas foram avaliadas aos 23, 30 e 38 foram registrados decréscimos de 10,8; 15,0, e 13,8% respectivamente, quando foram comparadas a primeira avaliação (15 dias após a emergência). Enquanto que na presença de Al^{3+} , ocorreram acréscimos de 3,9; 7,4; e, 11,4%, para a mesma comparação (Figura 1 C).

Tabela 3 - Vigor, altura de plântulas (cm), número de afilhos e número de folhas/afilhos para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Vigor		Altura de plântulas (cm)		Número de perfilhos		Número de folhas/perfilho	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	4,33±1,76aA ^{1/}	4,33±1,76bA	62,01±5,72 aA	37,50±3,42 aB	5,25±0,91 aA	2,25±0,39 cB	4,17±0,11 aA	4,50±0,36bA
Test2	3,00±2,00aA	8,33±0,67aA	53,51±6,24 aA	44,97±4,92 aA	4,33±0,84 aA	2,87±0,61 cA	4,00±0,12aA	4,25±0,16cA
Test3	5,67±1,33aA	5,67±1,76bA	51,65±5,24 aA	36,24±4,70 aB	5,50±0,97 aA	2,08±0,40 cB	3,92±0,19aA	4,33±0,28cA
Test4	9,00±0,00aA	7,00±0,00aA	49,92±5,46 aA	38,40±4,28 aA	6,00±1,13 aA	4,33±0,85 bA	3,67±0,19aA	3,75±0,13cA
Gen1	1,67±0,67aB	5,00±1,15bA	58,24±6,09 aA	40,53±4,61 aB	4,91±0,84 aA	2,50±0,42 cB	3,92±0,08aA	4,17±0,21cA
Gen2	3,67±0,66aA	7,67±1,33aA	47,85±4,69 aA	30,43±2,11 bB	6,50±1,11 aA	2,83±0,36 cB	3,83±0,11aA	4,00±0,17cA
Gen3	5,66±0,67aA	6,33±1,33bA	50,03±4,76 aA	30,46±2,12 bB	6,08±1,09 aA	2,58±0,47 cB	3,67±0,14aB	4,50±0,31bA
Gen4	5,67±0,66aA	6,33±0,67bA	49,71±4,75 aA	40,59±3,89 aA	4,58±0,71 aA	3,75±0,60 bA	4,00±0,12aA	4,17±0,11cA
Gen5	7,00±1,15aA	8,33±0,67aA	51,10±5,11 aA	32,70±3,06 bB	5,67±1,00 aA	2,83±0,46 cB	3,92±0,08aA	3,83±0,17cA
Gen6	3,66±0,67aA	4,33±0,66bA	53,87±5,09 aA	38,89±3,72 aB	6,00±1,02 aA	3,17±0,53 bB	4,00±0,00aA	4,00±0,00cA
Gen7	3,66±1,76aA	5,00±0,00bA	54,56±5,77 aA	51,90±5,61 aA	5,00±0,87 aA	3,42±0,47 bA	3,92±0,15aA	3,92±0,08cA
Gen8	5,00±2,00aA	7,00±0,00aA	56,49±5,52 aA	41,97±3,88 aB	4,75±0,87 aA	3,00±0,47 cA	3,83±0,17aA	4,08±0,08cA
Gen9	5,00±1,15aA	5,67±0,66bA	46,73±4,24 aA	40,88±4,56 aA	5,50±0,95 aA	3,50±0,60 bA	3,50±0,15aB	4,17±0,17cA
Gen10	7,00±0,00aA	9,00±0,00aA	54,27±6,03 aA	28,71±3,23 bB	6,42±1,37 aA	1,88±0,51 cB	3,92±0,08aB	5,50±0,82aA
Gen11	3,00±0,00aA	8,00±1,00aA	51,58±5,19 aA	27,90±2,00 bB	6,25±1,10 aA	1,33±0,22 cB	4,00±0,00aB	5,17±0,30aA
Gen12	3,67±1,33aA	9,00±0,00aA	55,03±5,92 aA	37,24±3,65 aB	4,17±0,64 aA	2,00±0,48 cB	3,92±0,15aB	4,58±0,29bA
Gen13	5,67±1,33aA	6,00±1,00bA	49,79±5,25 aA	23,94±2,18 bB	6,33±1,27 aA	1,25±0,18 cB	3,75±0,13aB	4,83±0,34bA
Gen14	4,33±1,76aA	6,33±1,76bA	56,56±5,63 aA	44,07±4,57 aA	4,50±0,70 aA	3,25±0,56 bA	3,83±0,11aA	4,00±0,21cA
Gen15	5,66±1,33aA	3,67±1,33bB	53,06±5,51 aA	43,57±4,60 aA	5,33±0,83 aA	3,58±0,48 bA	3,67±0,14aB	4,00±0,00cA
Gen16	5,66±1,33aA	3,67±1,76bA	48,88±5,19 aA	35,04±2,86 bB	5,83±1,05 aA	3,42±0,71 bA	3,75±0,13aA	4,00±0,12cA
Gen17	5,00±1,15aA	5,67±1,76bA	55,80±5,66 aA	41,13±4,14 aA	5,42±0,86 aA	2,67±0,47 cB	4,08±0,08aA	4,33±0,26cA
Gen18	7,67±1,33a	nd	46,46±4,96 aA	50,11±7,02 aA	5,08±0,87 aA	6,13±1,52 aA	3,58±0,19aA	3,50±0,19cA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

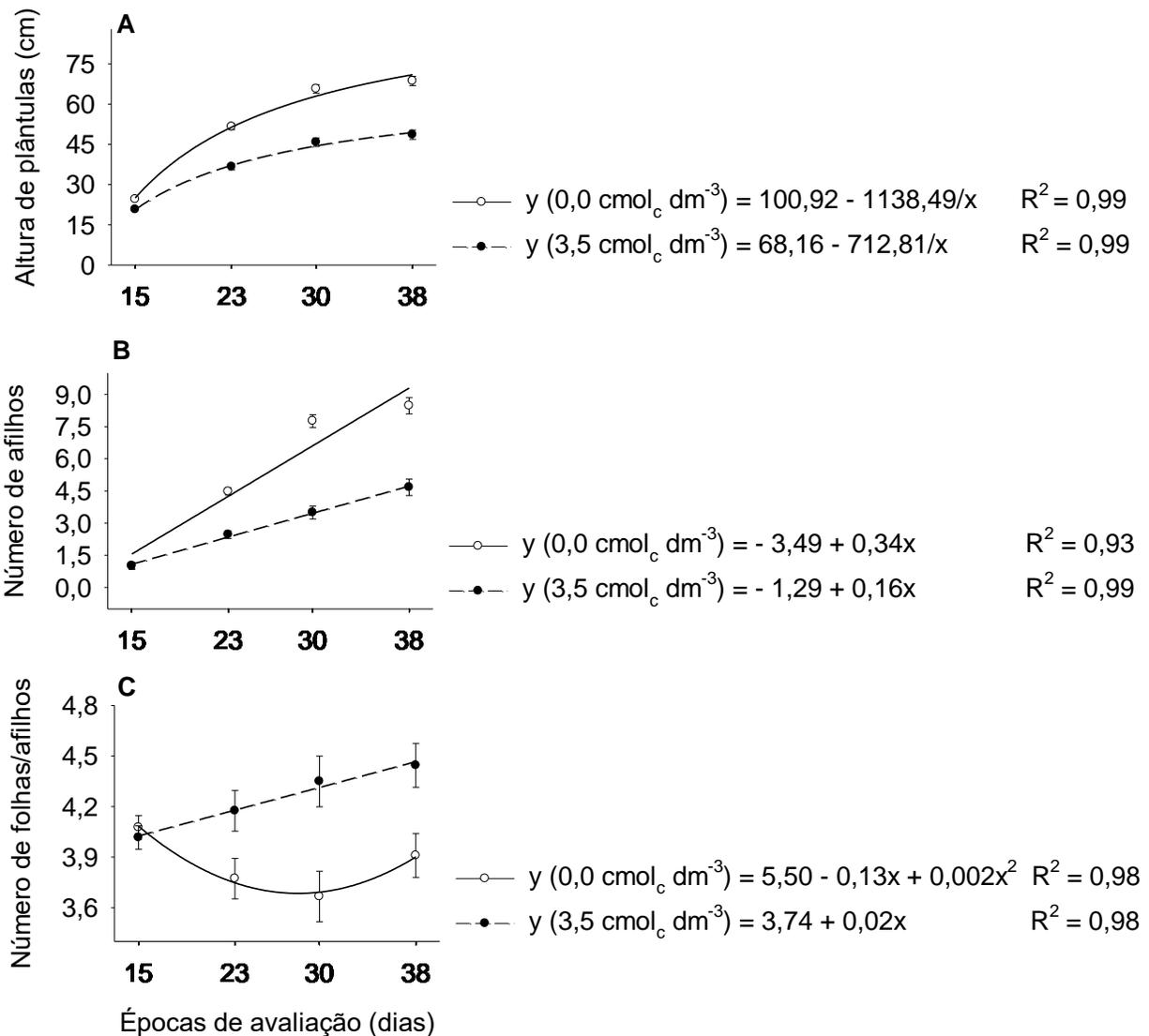


Figura 1 – Altura de plântulas (cm) (A), número de aflhos (B) e número de folhas/aflhos (C) de arroz em função das concentrações de alumínio em diferentes épocas de avaliação. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18. (As barras verticais representam a DMS pelo teste t ($p \leq 0,05$)).

Segundo a escala do IRRI (2002) foi verificada área foliar afetada por amarelecimento na primeira avaliação sem presença de Al^{3+} e os valores médios foram 0,67 (Test1, Test3, Gen2, Gen5) e 0,33 (Gen6, Gen8, Gen9, Gen10, Gen11, Gen12, Gen14, Gen17, Gen18). Entretanto, com a presença de Al^{3+} foram obtidos 3,00 (Gen13); 2,5 (Gen18); 1,67 (Test1); 1,00 (Gen3, Gen6, Gen8, Gen16); 0,67 (Test3, Gen9, Gen11, Gen12, Gen14); 0,50 (Test2, Gen10); 0,33 (Test4, Gen1, Gen2, Gen5, Gen7, Gen17). Aos 23 dias de avaliação sem Al^{3+} foi verificada média de 0,33 para os genótipos Gen2

e Gen6, e com a presença de Al^{3+} foram obtidos valores médios de 6,00 (Gen10); 5,67 (Gen11); 5,00 (Gen2, Gen3, Gen13); 4,33 (Test1); 4,00 (Test2, Gen5, Gen6); 3,67 (Gen1, Gen9, Gen16); 3,33 (Gen12); 3,00 (Gen17); 2,33 (Test3, Test4); 1,33 (Gen8, Gen14); e 1,00 (Gen4, Gen7). Para os 30 dias de avaliação sem Al^{3+} foram verificados valores médios de 0,67 (Test4, Gen1, Gen3) e 0,33 (Test1, Test2, Gen2, Gen11, Gen14). Já sob o efeito de Al^{3+} os valores foram maiores, 8,33 (Gen11); 8,00 (Gen10); 7,67 (Test1, Gen13); 7,00 (Gen3); 6,33 (Gen2, Gen5); 5,67 (Gen6); 5,00 (Test2, Test4, Gen8, Gen9, Gen17); 4,33 (Test3, Gen1, Gen4, Gen16); 4,00 (Gen12); 3,00 (Gen7, Gen14); 2,67 (Gen15); e 2,50 (Gen18). Na última avaliação, aos 38 dias, ainda ocorreu registro de área foliar afetada por amarelecimento, com valores médios para sem Al^{3+} de 2,67 (Test1, Test2); 2,33 (Gen3, Gen6); 2,00 (Gen14); 1,67 (Gen2); 1,33 (Gen9, Gen15, Gen17); 1,00 (Test4, Gen5, Gen11, Gen16, Gen11, Gen16); 0,67 (Test3, Gen1, Gen4, Gen7, Gen8, Gen10, Gen12, Gen13); e 0,33 (Gen18). Sob efeito do Al^{3+} , as médias foram 9,00 (Gen11); 7,67 (Test1, Gen3); 7,00 (Gen10); 6,33 (Gen13); 5,67 (Test3); 5,00 (Test2, Gen1, Gen2, Gen6); 3,67 (Gen4, Gen5, Gen8, Gen9, Gen12, Gen17); 3,00 (Test4, Gen16); 2,67 (Gen15); 2,00 (Gen14) e 1,33 (Gen7).

Para a área foliar afetada por clorose aos 15 dias de avaliação sem Al^{3+} foi constatada média de 0,33 para o genótipo Gen10 e sob a presença de Al^{3+} também foi obtida média de 0,33, porém para os genótipos Gen3 e Gen5. Na segunda época de avaliação foi constatada a maior incidência de clorose na área foliar, tanto sem Al^{3+} , obtendo valores médios de 1,00 para os genótipos Gen7, Gen9, Gen13; 0,67 para Gen2; e, 0,33 para Gen1, Gen3, Gen8, Gen10, Gen12, Gen14, Gen15 e Gen18, quanto com a concentração de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , resultando em valores médios de 2,33 (Gen2, Gen3); 1,67 (Gen14, Gen6); 1,33 (Test1, Gen5, Gen8, Gen17); 1,00 (Test3, Gen1, Gen16); 0,67 (Gen7, Gen11); 0,50 (Test2, Gen10); e, 0,33 (Test4, Gen12, Gen13). Ainda, aos 30 dias de avaliação ocorreu incidência de clorose, sem Al^{3+} com valores médios de 1,00 (Test4, Gen7); 0,67 (Gen3, Gen8, Gen9, Gen12, Gen13, Gen18); e 0,33 (Gen14, Gen15, Gen16, Gen17) e com a presença de Al^{3+} foi registrado 1,33 (Gen7); 1,00 (Test4, Gen15, Gen17) e 0,33 (Gen3, Gen8, Gen12, Gen14, Gen16). Na última época de avaliação ocorreu redução da incidência por clorose, mas foram encontrados valores

médios sem Al^{3+} de 1,00 (Test1, Gen1, Gen16); 0,67 (Gen17); e 0,33 (Test4, Gen3, Gen7, Gen10, Gen12) e com Al^{3+} , de 1,50 (Gen18), 1,00 (Gen4) e 0,33 (Gen7, Gen15).

Quanto a área foliar afetada por senescência, na primeira avaliação (15 dias após a emergência), sem a presença de Al^{3+} , foram contabilizadas médias de 0,67 para os genótipos Test4 e Gen8, e 0,33 para Gen5, Gen9 e Gen11. Ainda nessa mesma avaliação, porém na presença do Al^{3+} , somente o genótipo Test1 apresentou incidência, obtendo média de 0,33. Na segunda época de avaliação somente com a presença de Al^{3+} foi identificada média de 0,33 para os genótipos Test1 e Gen12.

Para as plantas que cresceram sem a presença de Al^{3+} avaliadas aos 15 dias somente ocorreu média de 0,33 para o número de folhas mortas por amarelecimento, tanto para o genótipo Gen2, quanto para Gen5. Enquanto que, nessa mesma data com a concentração de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} foi registrada média de 0,33 para o genótipo Gen16. Na última data de avaliação (38 dias) com Al^{3+} , foram documentados valores médios para o número de folhas mortas por amarelecimento nos genótipos Test1 (1,33), Test3 (1,67), Test4 (0,33), Gen2 (0,67), Gen3 (1,00), Gen10 (0,50), Gen11 (2,00) e Gen13 (1,33). Para o número de folhas mortas por clorose não ocorreram registros em todos os níveis dos fatores de tratamento testados. Entretanto, somente foram observadas folhas mortas por senescência nos genótipos Test2 e Test4, sem a presença de Al^{3+} aos 15 dias de avaliação, os quais obtiveram médias de 0,67 e 0,33 respectivamente, segundo a escala IRRI (2002). Com a presença de Al^{3+} , aos 23 dias de avaliação, somente houve morte de folhas por senescência nos genótipos Test1 e Gen12, ambos com média de 0,33.

Quanto ao número de afilhos mortos por amarelecimento, clorose e senescência, avaliados segundo a escala do IRRI (2002), não foi registrada nenhuma incidência desses sintomas, em todos os níveis dos fatores de tratamentos testados.

Quanto a floração plena ($F = 16,52$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), maturação ($F = 1,91$, $gl = 17$, $p = 0,0181$), comprimento da folha bandeira ($F = 3,35$, $gl = 20$, $p < 0,0001$) e largura da folha bandeira ($F = 5,47$, $gl = 20$, $p < 0,0001$) ocorreu significância para a interação entre os fatores de tratamento testados (genótipo e concentrações de alumínio) (Tabela 4).

O genótipo Gen1 apresentou o período de floração mais precoce na condição sem Al^{3+} . Enquanto que na presença do Al^{3+} , os genótipos mais precoces foram Test2, Gen1 e Gen15. Não foram verificadas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para Test2, Test4, Gen9, Gen17 e Gen18. Para a variável maturação, tanto na ausência quanto na presença de Al^{3+} , o genótipo mais precoce foi Gen1. Na comparação entre as concentrações somente foram registradas diferenças entre os genótipos Test4, Gen4, Gen5 e Gen15 (Tabela 4).

A importância de cada uma destas duas variáveis (floração e maturação) vão depender da finalidade que se tenha na hora da escolha dos genótipos. Os genótipos precoces vão ser mais importantes quando o tempo para o plantio é reduzido ou pelo contrário quando o tempo é amplo, os genótipos tardios tornaram-se mais importantes.

Em zero $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , Gen9, Gen12, Gen13 e Gen14 apresentaram os maiores comprimentos da folha bandeira, diferindo dos demais genótipos. Enquanto que na presença de Al^{3+} , esse mesmo comportamento foi verificado para Test3, Gen3, Gen4, Gen5, Gen7, Gen9, Gen12, Gen14, Gen15, Gen16, Gen17 e Gen18. Na comparação das concentrações de alumínio, foram verificadas diferenças significativas para Test1, Gen2, Gen6, Gen7, Gen11, Gen13, Gen14 e Gen16 (Tabela 4).

Quando não houve presença de Al^{3+} , a maior largura da folha bandeira foi nos genótipos Test1, Test4, Gen14, Gen15 e Gen18. Porém, na presença de Al^{3+} , os genótipos Gen12, Gen14, Gen15 e Gen18 registraram as maiores larguras, diferindo dos demais. Foram verificadas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para Test1, Test2, Test3, Gen2, Gen7, Gen11, Gen12, Gen13, Gen15 e Gen16 (Tabela 4). Para entender estes resultados, pode-se dizer que para que uma planta apresente uma boa taxa de fotossíntese, é necessária uma maior área foliar, é por isso que, no momento de selecionar genótipos nos programas de melhoramento, serão selecionados aqueles genótipos que tenham folhas mais compridas e largas garantindo assim uma boa taxa de fotossíntese, assegurando um bom desenvolvimento da planta. A literatura reporta que quando a planta chega a idade de 60 dias, sua taxa de crescimento fica estável, essa diminuição no crescimento tem relação com a fotossíntese que realiza a folha, com a idade e a taxa de respiração já que a área foliar é aumentada (YOSHIDA, 1972). O qual

Tabela 4 - Duração da floração plena e maturação (dias após o plantio - DAP), comprimento e largura da folha bandeira (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Floração plena (DAP)		Maturação (DAP)		Comprimento da folha bandeira (cm)		Largura da folha bandeira (cm)	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	91,11±0,42eB ^{1/}	123,00±0,00aA	124,00±0,00 e	nd	38,95±1,86 bA	24,26±2,10 bB	1,73±0,02aA	0,96±0,16cB
Test2	74,25±1,29gA	77,80±0,97dA	119,00±0,00 fA	119,00±0,00 eA	25,27±1,91 dA	24,07±0,93 bA	1,47±0,04cA	1,13±0,04cB
Test3	88,11±0,31fB	94,00±0,45cA	138,75±0,16 cA	138,00±0,00 cA	36,75±0,98 bA	36,43±1,66 aA	1,45±0,03cA	1,34±0,03cB
Test4	105,00±1,00cA	109,60±3,12bA	138,88±0,44 cB	142,50±1,50 bA	31,76±2,03 cA	26,74±1,71 bA	1,81±0,04aA	1,51±0,17bA
Gen1	64,00±0,00hB	71,29±2,33dA	99,00±0,00 gA	99,00±0,00 fA	29,82±0,69 dA	27,57±2,00 bA	1,37±0,02cA	1,18±0,11cA
Gen2	100,67±3,06dB	127,80±3,76aA	138,00±1,53 cA	136,00±4,00 cA	40,68±1,82 bA	27,17±1,68 bB	1,53±0,06cA	1,13±0,08cB
Gen3	106,33±3,05cB	132,00±2,31aA	137,78±2,37 cA	145,67±0,67 aA	36,58±2,35 bA	33,86±4,08 aA	1,40±0,07cA	1,20±0,06cA
Gen4	121,78±0,15aB	124,00±0,64aA	145,67±0,17 aB	147,22±0,22 aA	35,89±1,33 bA	33,23±1,06 aA	1,61±0,05bA	1,55±0,03bA
Gen5	115,00±2,01bB	125,50±2,22aA	143,33±1,03 aB	147,60±1,08 aA	39,46±1,63 bA	33,94±3,86 aA	1,51±0,07cA	1,41±0,13bA
Gen6	102,55±0,75cB	116,50±3,80bA	138,33±0,83 cA	141,00±0,00 bA	39,28±1,04 bA	29,03±3,40 bB	1,27±0,09dA	1,22±0,05cA
Gen7	87,00±1,15fB	90,33±0,44cA	124,00±0,00 eA	124,00±0,00 dA	35,06±1,75 cB	41,65±1,39 aA	1,26±0,06dB	1,43±0,04bA
Gen8	84,22±1,14fB	109,67±4,57bA	122,44±2,02 eA	124,00±2,45 dA	30,20±2,15 dA	26,37±2,36 bA	1,10±0,03eA	1,11±0,04cA
Gen9	105,00±0,96cA	107,71±2,92bA	137,11±1,46 cA	134,86±2,86 cA	45,81±2,55 aA	35,95±5,39 aA	1,28±0,02dA	1,09±0,09cA
Gen10	99,57±1,67d	nd	141,00±0,38 b	nd	37,53±1,75 b	nd	1,56±0,05b	nd
Gen11	96,33±1,80dB	122,00±2,31aA	124,00±0,00 e	nd	38,56±2,16 bA	27,11±2,81 bB	1,37±0,04cA	1,17±0,08cB
Gen12	86,78±0,70fB	117,00±4,00bA	135,67±0,60 cA	137,00±1,00 cA	41,96±1,52 aA	35,51±3,46 aA	1,42±0,03cB	1,69±0,15aA
Gen13	104,75±2,40cB	140,00±0,00aA	137,00±1,46 c	nd	42,61±1,37 aA	18,92±1,40 bB	1,53±0,04cA	0,98±0,04cB
Gen14	107,89±2,55cB	115,00±1,67bA	137,00±2,03 cA	140,78±1,36 bA	44,19±3,11 aA	35,33±3,38 aB	1,75±0,06aA	1,63±0,09aA
Gen15	105,22±2,50cA	81,00±0,98dB	144,00±0,00 aA	141,88±0,64 bB	37,70±2,81 bA	36,71±1,31 aA	1,70±0,03aB	1,80±0,03aA
Gen16	91,89±2,19eB	110,33±3,22bA	124,00±0,00 eA	124,00±0,00 dA	40,46±2,61 bA	32,15±2,08 aB	1,39±0,03cA	1,16±0,04cB
Gen17	97,67±2,05dA	102,78±4,95bA	132,00±0,00 dA	131,88±0,44 cA	38,49±1,20 bA	35,40±4,27 aA	1,42±0,07cA	1,30±0,11cA
Gen18	113,67±2,63bA	121,00±0,00aA	140,78±0,97 bA	142,00±0,00 bA	34,07±1,92 cA	39,33±3,09 aA	1,81±0,05aA	1,87±0,07aA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

indica que após os 60 dias a planta não deveria mostrar-se afetada pela toxicidade do Al^{3+} (FAGERIA, 1982).

Quanto ao comprimento do colmo ($F = 4,25$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), número de colmos por planta ($F = 3,45$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), percentual de fertilidade da espiguetta ($F = 4,76$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), e exercício da panícula ($F = 5,40$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), ocorreu interação entre genótipo e concentrações de alumínio (Tabela 5).

Os genótipos Gen14 e Gen18 apresentaram os maiores comprimentos do colmo, diferindo dos demais genótipos, quando não houve presença de Al^{3+} . Na presença do Al^{3+} , os maiores comprimentos de colmo foram para Test3, Gen4, Gen7, Gen14, Gen15 e Gen18. Não foram verificadas diferenças significativas entre as concentrações de alumínio para Test3, Test4, Gen3, Gen4, Gen5, Gen7, Gen9, Gen11, Gen14, Gen16 e Gen17 (Tabela 5).

Estes dados permitem fazer as seguintes considerações, tendo em conta as exigências do mercado, os genótipos selecionados para serem cultivares, tem que ter uma altura intermediária, pois uma planta muito alta é suscetível ao acamamento e também vai gastar muita energia em se manter e pouca energia vai ser direcionada para a produção e enchimento de grãos. Então estes resultados de plantas com alturas medianas ou intermediárias podem ser gerados pela genética de cada um destes materiais, já que são selecionados para ter uma altura apropriada para o mercado produtivo.

Na ausência de Al^{3+} , os genótipos que caracterizaram o menor número de colmos por planta foram Gen1, Gen7, Gen8, Gen12, Gen14 e Gen18. Entretanto, quando as plantas cresceram com $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} somente o genótipo Gen18, obteve maior resposta para esse parâmetro. Não foram registradas diferenças entre as concentrações de alumínio nos genótipos Test2, Test3, Test4, Gen1, Gen3, Gen5, Gen7, Gen8 e Gen15 (Tabela 5).

Em outros trabalhos reportados, genótipos de arroz foram analisados sob estresse por Al^{3+} e demonstraram como resultado, efeitos negativos sobre a formação de afilhos (MORENO-ALVARADO et al., 2017). Em outro estudo sobre espécies como *Brachiaria decumbens* e *Cenchrus ciliaries* também foram afetadas quanto ao afilhamento pela presença do Al^{3+} (FERNANDES; ROSSIELLO; ARRUDA, 1984). No arroz o número de

afilhos não é afetado pela presença do Al^{3+} (FREIRE et al., 1987). Tendo em conta que de cada um dos afilhos ao final do ciclo da cultura produz uma panícula, o fato de que o Al^{3+} afete o desenvolvimento do número de afilhos faz com que o número de panículas seja baixo e como consequência o rendimento também. Por isso pode ser entendido que um estresse no início pode ter como consequência a falta de emissão de afilhos e pode afetar o rendimento final.

Na concentração de $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , os genótipos Test1, Test2, Test3, Gen7, Gen12, Gen17 e Gen16, apresentaram os maiores percentuais para a fertilidade da espiguetta, diferindo dos demais genótipos. Enquanto que na presença de Al^{3+} , esse mesmo comportamento foi verificado para Test1, Test2, Test3, Test4, Gen7, Gen9, Gen14, Gen15, Gen16 e Gen17. Na comparação entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , foram verificadas diferenças significativas para Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen6, Gen7, Gen11, Gen12 e Gen15 (Tabela 5).

Alguns genótipos podem ser afetados por serem mais precoces ou tardios, por isso neste trabalho aqueles que foram tardios acabaram sendo mais prejudicados pelo frio, apresentado ao final do ciclo da cultura e no início do outono. A variável fertilidade da espiguetta, somente apresentou efeito entre as diferentes cultivares, possivelmente as cultivares que apresentaram os resultados adequados devido a floração ter ocorrido em um período com condições ambientais favoráveis (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010). Outro fato que pode ser prejudicial no enchimento dos grãos é que o Ca^{2+} intervém na germinação do grão de pólen e tal elemento é prejudicado na presença do Al^{3+} já que este último bloqueia os canais plasmáticos permeáveis por onde ingressa o Ca^{2+} o que permitiria dar início ao processo do crescimento do tubo polínico e posteriormente a formação do grão de pólen (ZHANG; RENGEL, 1999).

As plantas (controle) do genótipo Gen12, que não cresceram sob a influência da concentração de Al^{3+} apresentaram a maior exerceção da panícula. Porém, na presença de Al^{3+} , os genótipos Gen2, Gen5, Gen7, Gen8, Gen12, Gen16 e Gen18, registraram as maiores médias, diferindo dos demais. Foram verificadas diferenças significativas entre zero e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para Gen1, Gen5, Gen8, Gen9, Gen12, Gen16 e Gen17 (Tabela 5).

Tabela 5 - Comprimento do colmo (cm), número de colmos/planta, fertilidade da espiguetta (%) e exerceção da panícula para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Comprimento do colmo (cm)		Número de colmos por planta		Fertilidade da espiguetta (%)		Exerceção da panícula	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	57,23±1,25cA ^{1/}	34,56±2,66bB	10,33±0,73 aA	4,00±1,08 cB	91,43±1,92 aA	76,74±8,32 aB	4,33±0,33dA	3,00±0,00bA
Test2	54,59±0,79dA	42,83±1,68bB	10,88±1,59 aA	12,00±3,21 bA	91,28±1,78 aA	60,17±10,75 aB	1,00±0,00fA	1,00±0,00bA
Test3	64,34±1,82bA	64,28±1,78aA	10,38±1,28 aA	10,50±1,23 bA	85,73±2,77 aA	88,42±2,98 aA	3,00±0,00eA	3,33±0,33bA
Test4	63,37±0,97bA	56,03±5,10bA	13,25±1,08 aA	12,80±3,57 bA	75,24±5,67 bA	69,25±15,83 aA	2,25±0,37eA	1,40±0,40bA
Gen1	59,48±1,35cA	38,95±4,20bB	6,89±0,98 bA	5,37±0,42 cA	78,29±2,34 bA	28,65±7,43 bB	7,00±0,00bA	3,50±0,73bB
Gen2	56,26±1,19dA	45,06±3,13bB	10,44±0,90 aA	5,50±1,65 cB	71,38±6,91 bA	27,47±10,71 bB	4,33±0,33dA	5,00±0,00aA
Gen3	57,96±2,30cA	49,40±4,04bA	10,78±1,30 aA	4,75±2,59 cA	71,27±2,48 bA	22,79±5,87 bB	5,00±0,58cA	3,00±0,00bA
Gen4	61,29±1,26bA	62,14±1,43aA	10,22±0,74 aA	6,89±0,75 cB	22,17±4,63 eA	21,31±4,05 bA	3,00±0,00eA	3,00±0,00bA
Gen5	61,30±1,15bA	53,55±5,18bA	9,67±0,83 aA	6,83±1,62 cA	50,77±6,07 dA	50,93±4,69 bA	2,78±0,22eB	5,00±0,89aA
Gen6	58,75±1,19cA	46,74±3,11bB	12,55±1,47 aA	7,67±1,36 cB	68,75±3,42 bA	34,79±13,49 bB	3,00±0,00eA	3,00±0,00bA
Gen7	61,56±0,91bA	63,64±0,99aA	7,22±0,60 bA	6,89±0,59 cA	85,05±1,64 aB	93,84±1,20 aA	5,00±0,00cA	4,33±0,88aA
Gen8	53,70±2,00dA	43,72±3,79bB	7,22±0,91 bA	5,33±0,62 cA	67,67±2,63 bA	48,05±8,54 bA	3,00±0,00eB	4,33±0,33aA
Gen9	56,50±1,15dA	50,09±5,75bA	10,67±1,32 aA	6,50±0,78 cB	67,64±3,67 bA	63,75±9,67 aA	3,00±0,00eA	1,25±0,25bB
Gen10	59,66±2,70c	nd	11,57±2,20 a	nd	78,99±2,38 b	nd	2,71±0,29e	nd
Gen11	52,26±2,29dA	45,86±3,96bA	11,33±0,97 aA	4,00±1,53 cB	75,86±3,49 bA	20,82±20,81 bB	3,67±0,33dA	3,00±0,00bA
Gen12	63,44±1,01bA	52,81±3,91bB	7,44±0,58 bA	4,50±1,44 cB	84,73±1,83 aA	44,64±16,92 bB	9,00±0,00aA	6,00±0,58aB
Gen13	54,24±1,31dA	42,99±1,00bB	12,25±2,40 aA	3,50±0,50 cB	60,88±6,17 cA	37,64±21,25 bA	2,25±0,73eA	1,00±0,00bA
Gen14	69,13±2,12aA	69,95±3,11aA	8,11±0,79 bA	4,33±0,41 cB	61,12±6,50 cA	64,25±10,39 aA	3,00±0,58eA	3,00±0,58bA
Gen15	61,72±0,42bB	68,18±1,28aA	10,33±0,91 aA	8,38±0,70 cA	55,72±3,07 cB	74,95±3,25 aA	3,67±0,33dA	3,00±0,00bA
Gen16	59,44±2,99cA	54,39±3,37bA	10,11±0,68 aA	6,67±0,91 cB	82,17±3,13 aA	61,28±9,64 aA	7,00±0,58bA	5,00±0,00aB
Gen17	55,17±2,09dA	52,74±2,24bA	10,67±1,03 aA	6,11±1,36 cB	82,81±3,00 aA	67,53±10,11 aA	5,00±0,58cA	3,00±0,00bB
Gen18	67,65±1,16aB	72,18±1,00aA	8,00±1,09 bB	21,00±2,00 aA	43,22±6,99 dA	13,79±0,05 bA	5,68±0,33cA	5,00±2,00aA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

Quanto o comprimento da panícula ($F = 4,71$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), número de panícula por planta ($F = 3,22$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), número de grãos por panícula ($F = 3,30$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), e arista ($F = 4,00$, $gl = 18$, $p < 0,0001$) ocorreu interação entre genótipo e concentrações de alumínio (Tabela 6).

Os genótipos Test1, Gen1, Gen2, Gen3, Gen5, Gen6, Gen8, Gen9, Gen10, Gen12 e do Gen13 ao Gen18 apresentaram os maiores comprimentos da panícula, na ausência de Al^{3+} . Porém, as plantas cultivadas sob $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , as maiores médias ocorreram para Test3, Test4, Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen7, Gen8, Gen9, Gen11, Gen12, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18. Não foram verificadas diferenças significativas entre as concentrações de alumínio para Test3, Test4, Gen4, Gen7, Gen11, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 (Tabela 6).

Esta variável depende do genótipo, isso quer dizer, é um caráter controlado por poligenes que se encontram nos genitores e também depende do ambiente no qual se desenvolva o experimento (AMELA et al., 2008). Para um genótipo ser selecionado para ser uma cultivar comercial, tem que manter constantemente um bom tamanho de panícula, garantindo uma boa quantidade de grãos.

Na ausência de Al^{3+} , Test1, Test2, Test3, Test4, Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen6, Gen9, Gen10, Gen11, Gen13, Gen15, Gen16 e Gen17 diferiram dos demais genótipos e caracterizaram os maiores números de panícula por planta. Entretanto, quando as plantas foram cultivadas em $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} somente o genótipo Gen18 apresentou uma maior resposta para esse parâmetro. Foram registradas diferenças entre as concentrações de alumínio nos genótipos Test1, Gen2, Gen3, Gen4, Gen8, Gen9, Gen11, Gen12, Gen13, Gen14, Gen16, Gen17 e Gen18 (Tabela 6).

O número de panículas por m^2 foi afetado em solos onde a aplicação de calcário não apresentava a quantidade suficiente para neutralizar a toxidez pelo Al^{3+} (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010). Uma das possíveis respostas a qualquer um dos comportamentos destes resultados e tendo em conta que a diferenciação do número de panículas ocorre na fase vegetativa (CIAT, 1989) é o fato de que os genótipos que foram afetados pelo Al^{3+} e tinham pouca raiz, apresentavam pouca absorção de água na fase vegetativa, resultando em um menor desenvolvimento das plantas, ou pelo contrário, aqueles genótipos que tinham muitas raízes e em ótimas condições, contam com uma

boa absorção de água, assim como de nutrientes, o que vai contribuir com um bom número de panículas o que tem uma correlação direta com o número de afilhos por planta (AMELA et al., 2008).

Na concentração de $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , os menores números de grãos por panícula ocorreram nos genótipos Gen6 e Gen11, diferindo dos demais genótipos. Enquanto que na presença de Al^{3+} , esse mesmo comportamento foi verificado para Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen6, Gen8, Gen11, Gen13, Gen16 e Gen17. Na comparação das concentrações de alumínio, não foram verificadas diferenças significativas para Test3, Test4, Gen4, Gen5, Gen7, Gen9, Gen11, Gen12, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 (Tabela 6) onde se pode observar que o número de grãos por panícula não foi afetado pela presença do Al^{3+} .

A produtividade de grãos é influenciada pela aplicação de calcário e pelo fator cultivar, efeito semelhante também foi observado no número de panículas por m^2 , indicando uma correlação entre estas duas variáveis (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010). O número de grãos cheios é determinado na etapa de maturação (CIAT, 1989) e por isso é que se a planta desde o início não tinha um bom desenvolvimento, no final não é possível esperar um bom número de grãos, já que a planta sob estresse não tinha um bom número de afilhos, nem um bom número de panículas.

Quando as plantas cresceram sem Al^{3+} , nos genótipos Test3, Gen6, Gen8, Gen13, Gen17 e Gen18 não foi registrada a presença da arista. Porém, nas plantas cultivadas com o Al^{3+} , os genótipos Test3, Test4, Gen2, Gen3, Gen5, Gen6, Gen8, Gen13, Gen16, Gen17 e Gen18 registraram as menores médias, diferindo dos demais. Foram verificadas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para Gen2, Gen4, Gen5 e Gen18 (Tabela 6).

Tabela 6 - Comprimento da panícula (cm), número de panícula/planta, número de grãos/panícula e arista para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Comprimento da panícula (cm)		Número de panícula por planta		Número de grãos por panícula		Arista	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	22,51±0,69aA ^{1/}	7,41±0,41bB	10,33±0,73 aA	2,67±0,33 cB	83,15±7,55aA	15,28±2,10 bB	1,67±0,17a	nd
Test2	20,65±0,51bA	12,17±0,85bB	10,75±1,60 aA	10,80±3,21 bA	83,79±7,33 aA	32,93±4,36 bB	1,00±0,00bA	1,00±0,00aA
Test3	18,15±0,48bA	17,63±0,46aA	10,38±1,28 aA	8,83±1,81 cA	92,62±5,84 aA	100,14±11,68 aA	0,00±0,00eA	0,00±0,00bA
Test4	20,14±0,63bA	17,78±2,66aA	13,00±1,10 aA	12,20±3,84 bA	102,12±5,64 aA	84,47±18,35 aA	0,38±0,18dA	0,20±0,20bA
Gen1	22,59±0,42aA	13,86±1,56bB	6,78±0,92 bA	4,71±0,68 cA	116,55±7,56 aA	42,48±10,17 bB	0,44±0,17dA	1,00±0,00aA
Gen2	24,17±0,73aA	17,44±1,80aB	10,44±0,90 aA	5,33±1,71 cB	91,52±8,63 aA	48,25±12,39 bB	0,67±0,17cA	0,00±0,00bB
Gen3	23,78±0,99aA	18,93±2,17aB	10,78±1,30 aA	4,20±2,13 cB	100,30±8,43 aA	54,92±12,35 bB	0,55±0,18dA	0,00±0,00bA
Gen4	21,26±0,59bA	21,47±0,68aA	10,22±0,74 aA	6,89±0,75 cB	94,30±5,99 aA	99,48±8,58 aA	0,33±0,17dB	1,00±0,00aA
Gen5	23,07±0,61aA	18,74±2,33aB	9,67±0,83 aA	6,83±1,62 cA	96,22±6,63 aA	76,55±18,15 aA	1,33±0,17aA	0,50±0,22bB
Gen6	22,08±0,84aA	12,51±2,01bB	11,00±1,75 aA	6,57±1,46 cA	59,04±3,67 bA	28,14±6,03 bB	0,00±0,00eA	0,25±0,25bA
Gen7	20,77±0,54bA	20,61±0,51aA	7,22±0,60 bA	6,89±0,59 cA	88,04±5,84 aA	87,48±5,12 aA	0,67±0,17cA	0,89±0,11aA
Gen8	21,81±0,90aA	16,21±1,45aB	7,22±0,91 bA	4,44±0,81 cB	96,48±6,88 aA	53,92±9,03 bB	0,00±0,00eA	0,00±0,00bA
Gen9	23,81±0,70aA	18,26±2,41aB	10,67±1,32 aA	6,00±1,07 cB	98,26±5,55 aA	75,48±13,81 aA	1,00±0,00bA	1,00±0,27aA
Gen10	22,55±0,91a	nd	11,57±2,20 a	nd	106,62±11,78 a	nd	1,00±0,00b	nd
Gen11	20,84±1,14bA	18,42±0,40aA	11,33±0,97 aA	3,33±1,86 cB	62,37±6,83 bA	53,94±4,39 bA	0,33±0,17d	nd
Gen12	23,77±0,45aA	19,63±2,56aB	7,33±0,62 bA	4,50±1,44 cB	106,78±3,10 aA	82,88±20,88 aA	1,00±0,00bA	1,00±0,00aA
Gen13	22,46±0,73aA	13,49±0,83bB	12,25±2,40 aA	3,50±0,50 cB	98,19±4,20 aA	31,33±3,30 bB	0,00±0,00eA	0,00±0,00bA
Gen14	22,68±1,12aA	20,53±1,41aA	8,11±0,79 bA	4,00±0,53 cB	119,30±13,86 aA	101,89±15,48 aA	1,00±0,00bA	0,89±0,11aA
Gen15	23,29±1,13aA	22,20±0,57aA	9,33±1,25 aA	8,38±0,70 cA	95,22±7,84 aA	92,50±4,24 aA	1,00±0,00bA	1,00±0,00aA
Gen16	22,15±0,88aA	15,10±1,20bB	10,00±0,67 aA	6,22±0,70 cB	92,04±8,26 aA	49,37±7,74 bB	0,38±0,26dA	0,00±0,00bA
Gen17	23,80±0,94aA	20,76±1,73aA	10,55±1,06 aA	6,11±1,36 cB	85,67±8,51 aA	62,91±9,64 bA	0,00±0,00eA	0,00±0,00bA
Gen18	23,72±0,90aA	21,32±0,15aA	7,44±1,35 bB	21,00±2,00 aA	86,96±7,01 aA	90,83±3,50 aA	0,00±0,00eB	0,50±0,50bA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

Quanto ao degrane ($F = 4,18$, $gl = 18$, $p < 0,0001$), índice de colheita ($F = 4,14$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), massa de 100 grãos ($F = 6,82$, $gl = 20$, $p < 0,0001$), e massa da raiz ($F = 9,77$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) ocorreu interação entre genótipo e concentrações de alumínio (Tabela 7).

Os genótipos Test2, Test4, Gen1, Gen3, Gen5, Gen7, Gen9 e Gen18 apresentaram os menores degranos, sem Al^{3+} . Porém, nas plantas que cresceram com $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , não foram registradas diferenças entre os genótipos. Foram verificadas diferenças significativas entre a presença e a ausência de Al^{3+} para Test4, Gen4, Gen7 e Gen18 (Tabela 7). Na ausência de Al^{3+} , Test2, test3, Gen1 e Gen10 diferiram dos demais genótipos e caracterizaram os maiores índices de colheita. Entretanto, quando as plantas sob a concentração de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} somente o genótipo Test3 obteve a maior resposta para esse parâmetro. Foram registradas diferenças entre as concentrações de alumínio nos genótipos Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen6, Gen8, Gen11, Gen12, Gen13, Gen15 e Gen16 (Tabela 7). Na concentração de zero $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , maiores massas de 100 grãos ocorreram nos genótipos Gen3, Gen14 e Gen18, diferindo dos demais genótipos. Entretanto, na presença de Al^{3+} , os genótipos Test3, Gen2, Gen4, Gen5, Gen6, Gen7, Gen8, Gen9, Gen12, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 caracterizaram as maiores massas de 100 grãos. Na comparação das concentrações de alumínio, foram verificadas diferenças significativas para Test1, Test2, Gen1, Gen3, Gen11, Gen13, Gen15 e Gen16 (Tabela 7).

A massa de 100 grãos é determinada na etapa de maturação (CIAT, 1989) e foi influenciada pela aplicação de calcário. Quando a concentração de calcário aumentava, ou seja, quando o Al^{3+} diminuía, um dos genótipos apresentou acréscimo na massa de 1000 grãos (SORATTO; CRUSCIOL; MELLO, 2010). O alumínio interfere no desenvolvimento do tubo polínico e, também, com o enchimento do grão (ZHANG; RENGEL, 1999). Quando as plantas não foram estressadas com Al^{3+} , o genótipo Gen4 apresentou a maior massa de raiz, diferindo dos demais. Porém, com a presença de Al^{3+} , esse mesmo comportamento ocorreu para o genótipo Gen18. Foram verificadas diferenças significativas entre 0 e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} para Test1, Gen1, Gen2, Gen3, Gen4, Gen6, Gen8, Gen9, Gen10, Gen11, Gen12, Gen13, Gen14, Gen16, Gen17 e Gen18 (Tabela 7).

Tabela 7 - Degrane, índice de colheita, massa de 100 grãos (g) e raiz (g) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Degrane		Índice de colheita		Massa de 100 grãos (g)		Massa de raiz (g)	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	1,67±0,33c ^{1/}	nd	0,67±0,05 bA	0,02±0,00 cB	2,27±0,04 bA	0,99±0,05 cB	23,72±5,12bA	1,89±0,49cB
Test2	1,00±0,00dA	1,00±0,00aA	0,90±0,12 aA	0,23±0,02 cB	2,27±0,04 bA	1,68±0,07 bB	14,61±2,46cA	8,05±2,30cA
Test3	2,25±0,37bA	3,00±0,00aA	0,95±0,05 aA	0,93±0,08 aA	2,35±0,05 bA	2,45±0,03 aA	11,58±1,79cA	12,12±3,04cA
Test4	1,00±0,00dB	3,00±0,00aA	0,61±0,05 cA	0,41±0,13 cA	1,99±0,04 dA	1,91±0,07 bA	25,84±4,32bA	19,98±7,89bA
Gen1	1,00±0,00dA	1,00±0,00aA	1,01±0,08 aA	0,23±0,09 cB	2,33±0,04 bA	1,87±0,19 bB	8,49±1,22cA	2,37±0,75cB
Gen2	1,67±0,33cA	1,00±0,00aA	0,68±0,09 bA	0,23±0,08 cB	2,39±0,04 bA	2,24±0,12 aA	25,03±2,99bA	7,31±3,67cB
Gen3	1,00±0,00dA	1,00±0,00aA	0,60±0,05 cA	0,16±0,05 cB	2,45±0,09 aA	1,79±0,26 bB	31,86±5,99bA	4,30±1,88cB
Gen4	3,67±0,33aA	1,00±0,00aB	0,16±0,02 dA	0,14±0,02 cA	2,13±0,04 cA	2,13±0,03 aA	57,54±6,60aA	29,31±4,54bB
Gen5	1,00±0,00dA	1,00±0,00aA	0,38±0,05 dA	0,33±0,04 cA	2,37±0,07 bA	2,25±0,16 aA	25,27±2,93bA	16,20±6,55bA
Gen6	2,33±0,33bA	1,00±0,00aA	0,34±0,03 dA	0,10±0,05 cB	2,37±0,05 bA	2,06±0,28 aA	18,62±3,88cA	4,62±1,75cB
Gen7	1,00±0,00dB	1,89±0,35aA	0,71±0,04 bA	0,62±0,03 bA	2,01±0,05 dA	2,11±0,03 aA	15,79±2,69cA	16,51±1,80bA
Gen8	3,00±0,00bA	3,00±0,00aA	0,54±0,05 cA	0,24±0,05 cB	2,15±0,04 cA	1,99±0,09 aA	12,82±1,37cA	6,33±2,30cB
Gen9	1,00±0,00dA	1,00±0,00aA	0,60±0,04 cA	0,41±0,09 cA	2,15±0,09 cA	2,09±0,09 aA	16,87±2,08cA	8,42±3,12cB
Gen10	1,86±0,40c	nd	0,90±0,30 a	nd	2,37±0,04 b	nd	25,94±7,49bA	0,12±0,03cB
Gen11	4,00±0,45a	nd	0,38±0,04 dA	0,11±0,06 cB	2,02±0,04 dA	1,54±0,00 bB	31,88±3,22bA	7,08±4,07cB
Gen12	3,00±0,00bA	2,50±0,50aA	0,73±0,02 bA	0,21±0,10 cB	1,96±0,03 dA	2,09±0,28 aA	20,46±2,93cA	7,09±3,73cB
Gen13	1,75±0,37cA	1,00±0,00aA	0,50±0,05 cA	0,08±0,03 cB	2,15±0,08 cA	1,79±0,07 bB	18,35±1,95cA	1,48±0,30cB
Gen14	2,33±0,33bA	3,00±1,00aA	0,53±0,06 cA	0,42±0,08 cA	2,57±0,06 aA	2,59±0,08 aA	28,17±3,15bA	10,78±2,34cB
Gen15	1,67±0,33cA	2,25±0,37aA	0,41±0,04 dB	0,56±0,02 bA	2,25±0,03 bB	2,43±0,03 aA	24,01±3,16bA	19,40±3,42bA
Gen16	1,75±0,37cA	1,67±0,67aA	0,69±0,07 bA	0,33±0,06 cB	2,29±0,08 bA	1,91±0,15 bB	24,20±3,61bA	6,06±1,13cB
Gen17	2,33±0,33bA	2,33±0,33aA	0,75±0,18 bA	0,37±0,06 cA	2,17±0,02 cA	2,21±0,03 aA	23,60±2,13bA	12,62±3,85cB
Gen18	1,00±0,00dB	2,00±1,00aA	0,42±0,07 dA	0,24±0,02 cA	2,51±0,04 aA	2,56±0,00 aA	27,48±3,37bB	114,62±23,49aA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

Quanto a variável ângulo de abertura da raiz ($F = 3,84$, $gl = 21$, $p < 0,0001$), área da raiz ($F = 8,19$, $gl = 21$, $p < 0,0001$), a largura máxima da raiz ($F = 4,11$, $gl = 21$, $p < 0,0001$) e comprimento da raiz ($F = 2,61$, $gl = 21$, $p = 0,0002$) ocorreu interação entre genótipo e concentrações de alumínio (Tabela 8). Os genótipos Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen11, Gen14, Gen15 e Gen18 apresentaram os maiores ângulos de abertura da raiz sem a presença de Al^{3+} . Com $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} somente o genótipo Gen18 apresentou maior resposta para esse parâmetro. As diferenças significativas entre as concentrações de alumínio foram verificadas para Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen6, Gen8, Gen10, Gen11, Gen13 e Gen16 (Tabela 8). Os cereais têm como característica um enraizamento profundo o qual depende do ângulo de crescimento (medida de crescimento descendente) e no comprimento máximo da raiz. As cultivares de arroz existentes tem muitas variações em quanto a sua arquitetura do sistema radicular (UGA et al., 2013). Foi relatado que as mudanças do ângulo de crescimento da raiz não tinham nenhuma relação com as mudanças no número de raízes da coroa no arroz o qual está sustentado pela hipótese que aquelas características tem o controle delas em diferentes mecanismos genéticos (TOMITA et al., 2017).

Para a variável área da raiz, em $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} os genótipos Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen11, Gen14 e Gen17 apresentaram os maiores valores de área de raiz. Entretanto, na presença de Al^{3+} , somente o genótipo Gen18 destacou-se por ter a maior área de raiz. Na comparação das concentrações de alumínio, foram registradas diferenças nos genótipos Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen6, Gen8, Gen10, Gen11, Gen12, Gen13, Gen14, Gen16 e Gen18 (Tabela 8). Em outros trabalhos foram encontradas diferenças estatisticamente significativas para a variável área da raiz entre os genótipos e as concentrações de alumínio. A área da raiz foi reduzida em estudos prévios (SANTOS, 1991; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b) foi demonstrado que o Al^{3+} nas concentrações 0, 10, 20 e 30 mg L^{-1} de Al^{3+} afetou reduzindo a área da raiz significativamente, sendo esta variável considerada como a melhor para avaliar a tolerância ao Al^{3+} na cultura do arroz, seguido pela área foliar e o comprimento radicular (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b). Resultados contrários foram observados onde autores citam que a área radicular cria mais erro experimental, do que ao se avaliar o comprimento radicular onde se avalia um único eixo central, em quanto que a área

radicular é composta por ramificações laterais o que geram erros na variável (VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB-NETO, 2002) outros autores citam que a mensuração da área radicular não é comumente avaliada pela dificuldade na sua determinação (ROSSIELLO et al., 1995), e não deve ser utilizada para determinar a tolerância ao estresse pelo Al^{3+} entre os cultivares, pois este não encontrou efeito significativo nas fontes de variação sobre esta variável (DE MACEDO; KINET; VAN SINT JAN, 1997). Na cultura da soja foi demonstrado que quando as plantas foram expostas ao estresse pelo Al^{3+} , as raízes laterais apresentaram uma redução considerável em comparação ao comprimento, fato que faz que a área radicular seja mais sensível que a medição isolada do comprimento da raiz (PAN; HOPKINS; JACKSON, 1989).

Os genótipos Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen6, Gen10, Gen11, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 apresentaram as maiores larguras máximas da raiz, diferindo dos demais genótipos, na ausência de Al^{3+} . Na presença do Al^{3+} , o genótipo Gen18 apresentou a maior largura máxima da raiz diferindo dos demais. Foram verificadas diferenças significativas entre as concentrações de alumínio para Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen4, Gen5, Gen6, Gen8, Gen10, Gen11, Gen13, Gen14, Gen16 e Gen18 (Tabela 8).

Para a variável comprimento da raiz, em $0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , os genótipos Gen1, ao Gen5, Gen7, Gen9, Gen11, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18 apresentaram os maiores comprimentos de raiz. Com $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} somente o genótipo Gen18 apresentou o maior valor no comprimento da raiz diferindo dos demais. Foram verificadas diferenças significativas entre as concentrações de alumínio para os genótipos Test1, Test2, Gen1, Gen2, Gen3, Gen8, Gen10, Gen11 e Gen13 (Tabela 8). A diminuição da alongação radicular relativa foi relatada onde observou-se interação significativa para os genótipos e concentrações estudadas (VASCONCELOS; ROSSIELLO; JACOB-NETO, 2002; VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b), também foi observado que o comprimento da raiz é reduzido significativamente em concentrações de 0, 10, 20 e 30 mg L^{-1} de Al^{3+} e foi mais sensível a toxidez pelo Al^{3+} que as variáveis peso da massa seca radicular e peso de massa seca da parte aérea (VICENTE; ROSSIELLO; PEREIRA, 1998b). Na cultivar Test3 estudado no trabalho de SERRA (2016) evidenciou-se que 72 horas após do tratamento com alumínio, a influência desse elemento no crescimento radicular foi consideravelmente pequena em comparação com a outra cultivar estudada.

Tabela 8 - Ângulo de abertura da raiz, área da raiz (cm²), largura máxima da raiz (cm) e comprimento da raiz (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Genótipo	Ângulo de abertura da raiz		Área da raiz (cm ²)		Largura máxima da raiz (cm)		Comprimento da raiz (cm)	
	Concentrações de alumínio (cmol _c dm ⁻³)							
	0	3,5	0	3,5	0	3,5	0	3,5
Test1	30,28±1,56bA ^{1/}	9,38±1,04cB	101,84±4,25 bA	32,86±3,59 cB	5,30±0,26bA	6,01±2,51 bA	197,49±24,52bA	74,08±18,64cB
Test2	33,60±2,41bA	20,88±3,05cB	112,16±4,93 bA	58,81±7,02 cB	5,61±0,28bA	3,90±0,38 cB	228,26±14,95bA	140,10±20,51cB
Test3	25,72±2,27bA	27,03±5,85bA	84,77±8,27 bA	78,19±15,02 cA	4,78±0,25bA	4,70±0,55 bA	165,27±24,10bA	166,48±25,70cA
Test4	33,65±1,46bA	29,98±5,18bA	117,13±7,52 bA	107,70±24,43 bA	5,67±0,26bA	4,97±0,79bA	215,08±19,05bA	251,18±64,27cA
Gen1	35,05±2,17bA	13,99±3,75cB	106,81±8,81 bA	41,34±9,35 cB	5,87±0,36bA	3,29±0,40 cB	408,72±62,74aA	152,35±41,85cB
Gen2	41,48±3,70aA	19,55±4,61cB	121,92±5,66 aA	53,98±14,55 cB	6,17±0,24aA	4,07±0,65 cB	340,09±26,17aA	134,06±42,85cB
Gen3	50,84±4,14aA	16,88±5,80cB	136,09±8,26 aA	35,30±9,30 cB	7,05±0,28aA	3,54±0,36 cB	340,35±24,87aA	75,34±11,63cB
Gen4	44,81±3,49aA	36,98±2,19bA	140,17±12,88 aA	113,17±8,50 bA	7,15±0,41 aA	6,03±0,29bB	415,12±64,62aA	366,44±65,29bA
Gen5	41,52±2,73aA	31,95±6,43bA	138,74±6,94 aA	109,42±26,39 bA	6,47±0,24 aA	5,21±0,63 bB	381,28±33,58aA	290,48±66,20bA
Gen6	35,43±3,20bA	16,88±4,40cB	108,82±9,03 bA	52,20±11,58 cB	6,32±0,40aA	3,90±0,46 cB	281,16±51,24bA	180,91±47,53cA
Gen7	35,49±2,04bA	31,82±2,02bA	109,74±5,91 bA	94,51±4,23 bA	5,98±0,35bA	5,59±0,21 bA	381,57±54,53aA	326,37±33,25bA
Gen8	31,27±1,31bA	16,40±3,05cB	101,45±5,95 bA	51,15±9,20 cB	5,35±0,36bA	3,64±0,30 cB	289,04±35,31bA	113,17±31,65cB
Gen9	36,77±2,62bA	22,34±6,34cA	99,71±5,93 bA	64,60±15,30 cA	5,29±0,25bA	4,22±0,54 cA	353,38±33,92aA	235,60±64,21cA
Gen10	35,06±5,37bA	1,10±0,50cB	112,88±17,63 bA	8,65±1,61 cB	6,06±0,62aA	2,23±0,53 cB	244,75±26,45bA	41,86±5,54cB
Gen11	44,03±2,68aA	22,80±8,05cB	131,18±8,63 aA	70,45±26,38 cB	7,09±0,32 aA	4,29±0,74 cB	402,35±36,72aA	165,86±61,68cB
Gen12	28,20±2,76bA	18,83±6,42cA	92,02±9,88 bA	49,95±16,72 cB	4,99±0,35bA	3,89±0,73 cA	180,08±25,29bA	145,75±50,07cA
Gen13	35,73±2,96bA	10,26±2,27cB	102,66±6,47 bA	32,41±6,01 cB	5,68±0,27bA	3,27±0,17 cB	278,38±27,79bA	102,13±15,81cB
Gen14	45,50±3,34aA	33,17±5,06bA	142,93±4,41 aA	93,12±11,57 bB	6,42±0,42aA	5,31±0,34 bB	479,80±72,83aA	320,45±48,57bA
Gen15	38,87±2,46aA	40,90±3,95bA	116,83±5,12 bA	124,49±15,02 bA	6,14±0,25aA	6,24±0,43 bA	333,50±34,00aA	429,80±75,90bA
Gen16	35,35±2,08bA	23,90±2,45cB	113,15±8,52 bA	70,40±7,88 cB	5,87±0,30bA	4,54±0,25 cB	264,69±33,61bA	191,97±28,51cA
Gen17	36,28±2,42bA	28,09±4,69bA	121,54±6,70 aA	91,30±16,94 bA	6,34±0,24aA	5,08±0,65 bA	338,90±35,37aA	264,46±62,81cA
Gen18	42,57±4,72aA	64,50±0,50aA	116,75±7,62 bB	208,70±5,75 aA	6,52±0,35aB	10,45±0,56aA	413,59±52,97aA	670,79±39,99aA

^{1/} Médias (± erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p≤0,05) comparando os genótipos em cada concentração de alumínio e pelo teste t (p≤0,05) comparando as concentrações de alumínio em cada genótipo, respectivamente. nd: não determinado.

Para profundidade de largura máxima de raiz somente ocorreu significância para as concentrações de alumínio ($F = 14,22$, $gl = 1$, $p = 0,0002$), em que a maior profundidade foi registrada sem a presença de Al^{3+} (Tabela 9).

Tabela 9 - Profundidade de largura máxima de raiz (cm) para diferentes genótipos de arroz em função do alumínio. UFPel, Pelotas/RS, 2017/18

Concentrações de alumínio ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Profundidade de largura máxima de raiz (cm)
0	4,91±0,23 a
3,5	3,34±0,25 b

^{1/} Médias (\pm erro padrão) acompanhadas por mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$) comparando as concentrações de alumínio.

A matriz de dados das variáveis analisadas, ou seja, das 25 variáveis dependentes, relacionada aos fatores de tratamento estudados (genótipos e concentrações de Al^{3+}) foi submetida a Análise de Componentes Principais (ACP) a fim de diminuir o número de descritores associados ao conjunto de dados e ao mesmo tempo preservar a maior parte da variabilidade. Para explicar a distribuição dos grupos foi necessário menor número de componentes principais em função da quantidade de altas e/ou médias correlações entre as variáveis dependentes, fator esse que é variável em função da população estudada (MANLY, 1988). Portanto, de acordo com a regra de JOLLIFFE (2002) apenas os dois CPs foram utilizados nas análises por contemplarem 70% da variação tanto na comparação dos efeitos dos genótipos na presença ou ausência de Al^{3+} quanto na verificação das diferenças na interação entre genótipos e concentração de Al^{3+} (Figura 2 A, B e C).

Na ausência de Al^{3+} , o novo conjunto de variáveis ortogonais (CPs) foi gerado pela ACP, onde o primeiro componente principal (CP1) apresentou o maior autovalor, de 16,19 e representou 64,85% da variabilidade no conjunto de dados. O segundo CP teve autovalor de 3,41, e foi responsável por 13,67% da variância nos dados. O restante dos CPs gerados produziu progressivamente autovalores menores e não explicaram de forma significativa a variabilidade dos dados. Os dois primeiros componentes principais explicaram grande proporção da variação total, ou seja, 78,52%, o que possibilitou a plotagem dos escores e das cargas dos componentes referentes aos níveis do fator de tratamento estudado (genótipo) (Figura 2 A).

Verificou-se a formação de um grupo, composto por Gen2, Gen3, Gen5, Gen6, Gen9, Gen10, Gen11, Gen13, Gen15, Gen16, Gen17 e Gen18, que caracterizaram comportamento semelhante entre si e distinto em relação ao segundo grupo formado

(Test1, Test2, Test3, Gen8, Gen7 e Gen12) e aos demais genótipos, perante as variáveis dependentes avaliadas (Figura 2 A). Analisando os autovetores correspondentes à CP1 destacaram-se duração da floração (0,35), fertilidade da espiguetta (-0,30), massa da raiz (0,30) e ângulo da raiz (0,30). Já na CP2, número de colmo por planta (-0,42), número de panículas por planta (-0,42) e comprimento da raiz (0,32) também contribuíram para essa diferenciação.

Para o primeiro grupo formado foram verificadas correlações positivas entre massa de raiz com floração ($r = 0,72$, $p = 0,0002$), ângulo da raiz ($r = 0,64$, $p = 0,001$), área da raiz ($r = 0,71$, $p = 0,0002$), largura máxima da raiz ($r = 0,71$, $p = 0,0002$); comprimento da folha bandeira com comprimento da panícula ($r = 0,43$, $p = 0,04$); número de colmo por planta com número de panícula por planta ($r = 0,98$, $p < 0,0001$); área da raiz com largura máxima da raiz ($r = 0,89$, $p < 0,0001$) e comprimento da raiz ($r = 0,70$, $p = 0,0003$); largura máxima da raiz com comprimento da raiz ($r = 0,72$, $p = 0,0002$). Enquanto que no segundo grupo foram registradas correlações positivas entre índice de colheita com fertilidade da espiguetta ($r = 0,78$, $p < 0,0001$) e altura de plântula ($r = 0,49$, $p = 0,02$).

Ao realizar a análise considerando os genótipos na presença de Al^{3+} ($3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) observou-se a formação de um pequeno grupo, composto pelos genótipos Gen7, Gen4, Gen14, Test3, Gen17 e Gen5, que se comportaram de forma distinta em relação aos demais genótipos. Os dois primeiros componentes principais explicaram 75,40% da variação total, onde o CP1 foi responsável por 66,60% com autovalor de 16,63 e CP2 caracterizou 8,80% da diferenciação com autovalor menor (2,20). Os demais CPs não contribuíram de forma significativa para a diferenciação. As variáveis que foram determinantes para a separação dos grupos com seus respectivos autovetores foram comprimento de colmo (0,29), ângulo da raiz (0,31), área da raiz (0,29), largura máxima da raiz (0,30) e comprimento da raiz (0,29) para CP1, e duração da floração (0,35), número de colmo por planta (-0,37) e número de panícula por planta (-0,36), na CP2 (Figura 2 B).

Nesse grupo formado, os genótipos Gen7, Gen4, Gen14, Gen17 e Gen5 formam semelhantes ao Test3, ou seja, esses genótipos comportaram-se como tolerantes ao Al^{3+} e também, foram registradas correlações positivas entre massa de raiz com ângulo da raiz ($r = 0,85$, $p < 0,001$), área da raiz ($r = 0,86$, $p < 0,0001$) e largura máxima da raiz ($r = 0,88$, $p < 0,0001$); comprimento da folha bandeira com comprimento da panícula ($r = 0,75$, $p < 0,0001$); número de colmo por planta com

número de panícula por planta ($r = 0,99$, $p < 0,0001$); área da raiz com largura máxima da raiz ($r = 0,90$, $p < 0,0001$) e comprimento da raiz ($r = 0,96$, $p < 0,0001$); largura máxima da raiz com comprimento da raiz ($r = 0,89$, $p < 0,0001$); índice de colheita com fertilidade da espigeta ($r = 0,69$, $p = 0,0005$) e altura de plântula ($r = 0,49$, $p = 0,02$) (Figura 2 B).

Quando foi realizada a análise considerando a interação entre genótipo e concentrações de Al^{3+} , os dois primeiros componentes principais explicaram 75,78% da variação total, onde o CP1 foi responsável por 64,53% com autovalor de 16,13 e CP2 caracterizou 11,25% da diferenciação com autovalor menor (2,81). Os demais CPs não contribuíram de forma significativa para a diferenciação. Ocorreu a formação de dois grandes grupos, um deles formado pela interação genótipo e sem Al^{3+} ($0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e, o outro grupo composto por genótipo e $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} (Figura 2 C).

Entretanto, dentro do primeiro grupo formando (sem a presença de Al^{3+}), dois genótipos (Gen15 e Gen17) que cresceram com Al^{3+} , comportaram-se como se não tivessem desenvolvidos sob a presença de Al^{3+} . Nesse grupo ocorreram correlações positivas entre massa de raiz com ângulo da raiz ($r = 0,80$, $p < 0,001$), área da raiz ($r = 0,82$, $p < 0,0001$) e largura máxima da raiz ($r = 0,85$, $p < 0,0001$); comprimento da folha bandeira com comprimento da panícula ($r = 0,73$, $p < 0,0001$); número de colmo por planta com número de panícula por planta ($r = 0,99$, $p < 0,0001$); área da raiz com largura máxima da raiz ($r = 0,92$, $p < 0,0001$) e comprimento da raiz ($r = 0,90$, $p < 0,0001$); largura máxima da raiz com comprimento da raiz ($r = 0,87$, $p < 0,0001$); índice de colheita com fertilidade da espigeta ($r = 0,78$, $p < 0,0001$) e altura de plântula ($r = 0,69$, $p < 0,0001$). As variáveis que foram determinantes para formação dos grupos com seus respectivos autovetores foram comprimento de panícula (0,26), número de grãos por panícula (0,25), ângulo da raiz (0,29), área da raiz (0,29), largura máxima da raiz (0,29) e altura de plântula (0,25) na CP1 e, duração da floração (0,45) e maturação (0,44) e fertilidade da espigeta (-0,32) na CP2 (Figura 2 C).

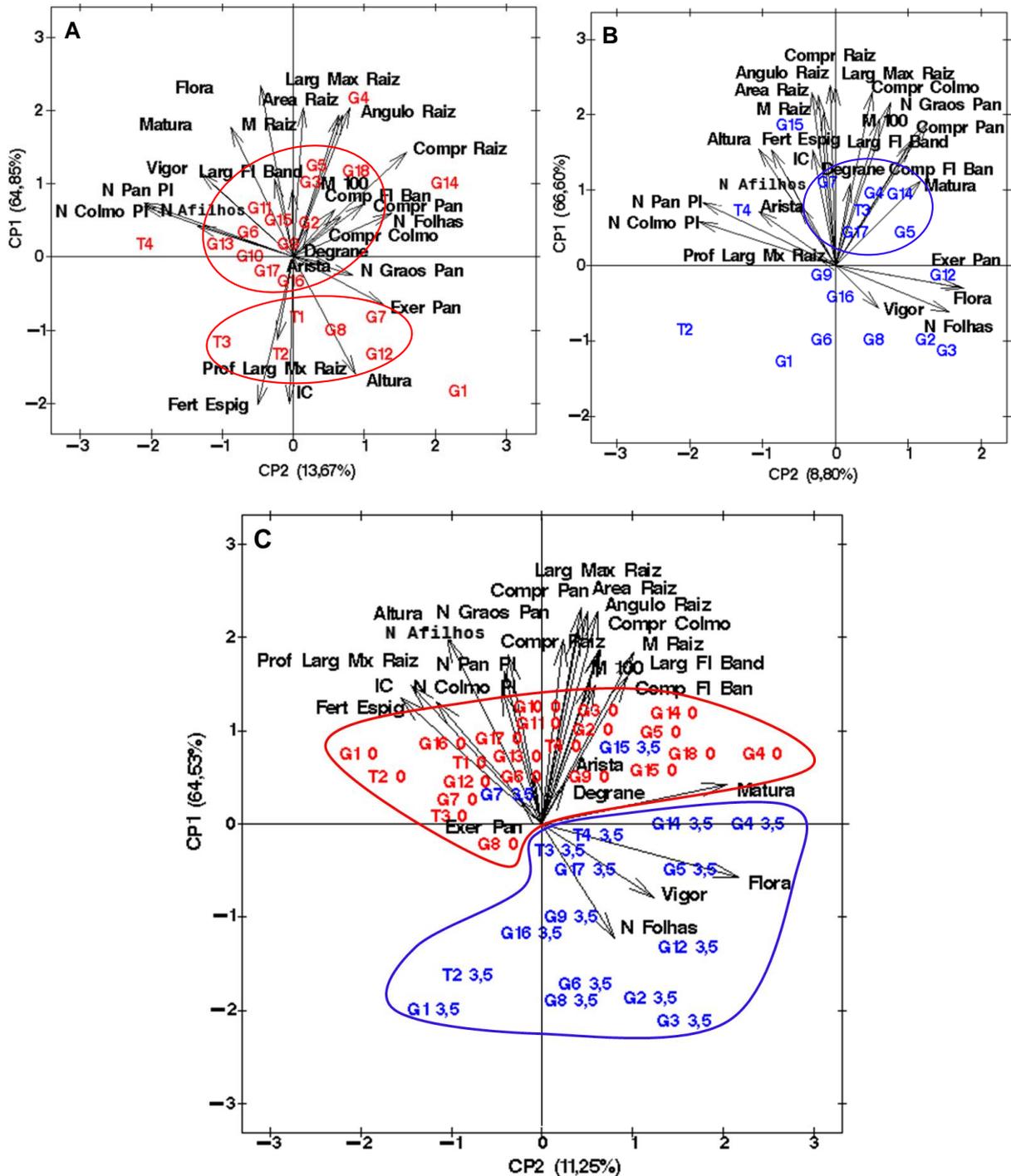


Figura 2 - Plotagem dos escores e das cargas dos CP1-CP2 referente as variáveis dependentes mostrando o comportamento dos genótipos na ausência (A) e presença de Al^{3+} (B), e a interação (C) entre os genótipos e as concentrações de Al^{3+} (0 e 3,5 $cmolc\ dm^{-3}$). Variáveis dependentes: vigor; altura de plântula (Altura); número de afilhos (N Afilhos); número de folhas/afilho (N Folhas); floração plena (Flora); maturação (Matura); comprimento da folha bandeira (Comp FI Ban); largura da folha bandeira (Larg FI Band); comprimento do colmo (Compr Colmo); número de colmos por planta (N Colmo PI); percentual de fertilidade da espiguetta (Fert Espig); exercício da panícula (Exer Pan); comprimento da panícula (Compr Pan); número de panícula por planta (N Pan PI); número de grãos por panícula (N Grãos Pan); arista; degrane; índice de colheita (IC), massa de 100 grãos (M 100); massa de raiz (M Raiz); ângulo de abertura (Ângulo Raiz), área de raiz (Área Raiz), largura máxima de raiz (Larg Max Raiz), comprimento de raiz (Compr Raiz), profundidade de largura máxima da raiz (Prof Larg Mx Raiz).

Quanto as doenças características para a cultura do arroz não ocorreu registro de Helminthosporiose na folha em nenhum dos genótipos testados. Entretanto, na panícula foi verificada média de 0,33 para os genótipos Gen2 e Gen7. Da mesma forma, para *Pyricularia oryzae* (Brusone do pescoço e da folha), *Gerlachia oryzae*, *Cercospora oryzae*, *Burkholderia spp*, Virus da folha branca não ocorreram incidências em nenhum dos genótipos. Quanto a *Sarocladium oryzae* obteve-se valor médio de 0,33 para o genótipo Gen6 e 0,67 para Gen16.

Segundo a escala do IRRI (2002), para mancha de grãos, os valores médios variaram de 0,67 para o genótipo Gen18 e até 4,33 para Gen9. A incidência de *Rhizoctonia solani* foi maior, chegando a 6,33 para Gen18 e 5,67 para Gen5 e Gen17. Para o mal do pé (*G. graminis*), os genótipos Gen4, Gen9 e Gen14 não apresentaram sintomas da doença, enquanto que a maior incidência foi verificada para Gen6 (5,67) e os genótipos Gen11 (2,33), Gen7 e Gen12 (3,00) caracterizaram valores intermediários (Figura 3).

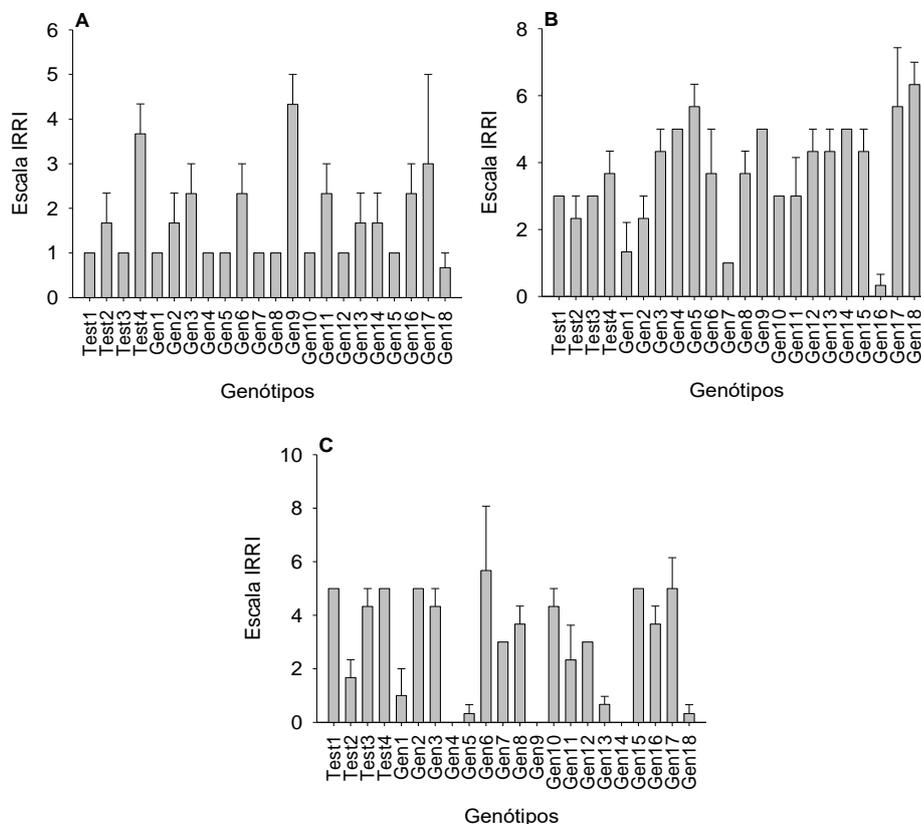


Figura 3 - Valores médios, segundo escala IRRI (2002), para Mancha dos grãos (A), *Rhizoctonia solani* (B) e Mal do pé (*G. graminis*) (C) para os diferentes genótipos de arroz. (As barras verticais representam o erro padrão).

Na Figura 4 evidencia-se o resultado nas raízes em quanto a sua tolerância ao Al^{3+} deixando ver claramente o efeito que este elemento causa no crescimento radicular. Evidenciando aqueles genótipos tolerantes e susceptíveis.



Figura 4 - Comparação do efeito causado nas raízes sob os tratamentos com presença (A) e ausência de Al^{3+} (B).

4.5 Conclusões

Os genótipos Gen15, Gen7 Gen14 e Gen17 sob $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ comportam-se como tolerantes ao alumínio, sendo os dos primeiros que mostraram uma maior tolerância ao Al^{3+} .

As variáveis ângulo da raiz, área da raiz, largura máxima da raiz e fertilidade da espiguetta podem ser usadas para discriminar genótipos sensíveis e tolerantes ao estresse pelo alumínio.

5 Considerações finais

Devido à grande importância desta cultura tanto no Brasil quanto na Colômbia e, também pela sua expansão em regiões onde a acidificação dos solos é um problema prevalente, produzir informações nesta direção beneficiará a cadeia agrícola mundial do arroz. Em trabalhos futuros, o monitoramento dos parâmetros, comprimento da parte aérea e segunda folha, massa da matéria seca de raiz juntamente com ângulo da raiz, área da raiz, largura máxima da raiz e fertilidade da espiguetas poderão ser usados com eficiência para discriminar genótipos sensíveis e tolerantes ao estresse pelo alumínio.

A evidência atual indica que as plantas de arroz em solos ácidos evoluíram várias estratégias para superar o estresse por Al^{3+} . Os genótipos Gen3, Gen5, Gen6, Gen7, Gen14, Gen15, Gen17 e Gen18, comportam-se como tolerantes a esse elemento químico e são materiais promissores para análises futuras. Os mecanismos bioquímicos e moleculares subjacentes a essas estratégias, no entanto, ainda não foram investigados. A abordagem futura envolveria a identificação de genes que desempenham papel na adaptação desses genótipos de arroz em ambientes com Al^{3+} .

Referências

ACEVEDO, M. A; CASTRILLO, W. A. Origen, Evolución Y Diversidad Del Arroz. **Agronomía Tropical**, v. 56, n. 2, p. 151–170, 2006.

ALAMGIR, A. N. M.; AKHTER, S. Effects of aluminium (Al^{3+}) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*). **Banlgadesh Journal Botany**, v. 38, n. 1, p. 1–6, 2009.

AMELA, F. A. et al. Parámetros genéticos de la longitud de panícula en arroz. **Acta Agronómica**, v. 57, n. 4, p. 233–239, 2008.

AUSTRALIAN OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR. The biology and ecology of rice (*Oryza sativa* L.) in Australia. **The office of the gene technology regulator**. February, p. 28, 2005.

AZAMBUJA, I. H. V.; VERNETTI, F. DE J.; MAGALHÃES, A. M. DE. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. DA S.; MAGALHÃES, A. M. DE (Eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1. ED. Brasília, Brasil: EMBRAPA, 2004. P. 23-44.

BALDINO, P. S. et al. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, v. 24, p. 30, 2010.

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

BASSAM, N. EL; DAMBROTH, M.; LOUGHMAN, B. C. Genetic aspects of plant mineral nutrition. **Developments in plant and soils sciences**, v. 42, p. 523. 1990.

BASU, U.; GOOD, A G.; TAYLOR, G. J. Transgenic *Brassica napus* plants overexpressing aluminium-induced mitochondrial manganese superoxide dismutase cDNA are resistant to aluminium. **Plant, cell & environment**, v. 24, p. 1269–1278, 2001.

BELDRANO, J.; GIMENEZ, D. O. **Cultivo en hidroponía**. 1. ed. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata, 2015. v. 1

BEUTLER, A. N. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista brasileira da ciencia do solo**, v. 36, p. 1601–1607, 2012.

BEZERRA NETO, E. BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 8, n. 9, p. 107–137, 2012.

CAMACHO-TAMAYO, J. H.; LUENGAS, C. A.; LEIVA, F. R. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia. **Chilean journal of agricultural research**, v. 68, n. 1, p. 42–55, 2008.

CAMARGO, C. E. O.; OLIVEIRA, O. F. Efeito de diferentes concentrações de sais em solução nutritiva na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, v. 40, n. 8, p. 93–101, 1981.

CARREÑO, A.; CHAPARRO-GIRALDO, A. Tolerancia al aluminio en especies vegetales : mecanismos y genes. **Universitas Scient**, v. 18, n. 3, p. 283–310, 2013.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). **Morfología de la Planta de Arroz**. Cali, Colômbia: CIAT, 2005. Disponível em: <<http://ciat.cgiar.org/riceweb/esp/inicio.htm>>.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). **Componentes del rendimiento en arroz**. Guía de Estudio. Contenido Científico: International Rice Research Institute. Traducción y adaptación: Oscar Arregocés. Cali, Colombia. CIAT, p. 19. 1989

CHANG, T. T. The origin, evolution, cultivation, dissemination, and diversification of Asian and African rices. **Euphytica**, v. 25, n. 1, p. 425–441, 1976.

CIVÁÑ, P.; BROWN, T. A. Origin of rice (*Oryza sativa* L.) domestication genes. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 64, n. 6, p. 1125–1132, 2017.

COLLINS, N. C. et al. An ALMT1 gene cluster controlling aluminum tolerance at the *Alt4* Locus of Rye (*Secale cereale* L.). **Genetics Society of America**, v. 179, n. 1, p. 669–682, 2008.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do arroz**. 1. ed. Brasília, Brasil: CONAB, 2015.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. DA; SERENO, M. J. C. DE M.; NETO, J. F. B. Tolerância ao alumínio em plantas: Toxicidade, Mecanismos e Genes em Espécies Cultivadas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 14, n. 3–4, p. 1–10, 2008.

CONTRERAS, M. S. **Tolerância de cultivares de arroz colombiano ao alumínio em solução nutritiva**. Universidade Estadual de Londrina, pág. 66, 2013.

CUMMING, J. R.; WEINSTEIN, L. H. Aluminum-mycorrhizal interactions in the physiology of pitch pine seedlings. **Plant and Soil**, v. 125, n. 1, p. 7–18, jun. 1990.

DAVIS, W. B.; MCCAULEY, M. J.; BYERS, B. R. Iron requirements and aluminum sensitivity of an hydroxamic acid-requiring strain of *Bacillus megaterium*. **Journal of Bacteriology**, v. 105, n. 2, p. 589–594, 1971.

DE LIMA, M. L.; COPELAND, L. The effect of aluminum on the germination of wheat seeds. **Journal of Plant Nutrition**, v. 13, n. 12, p. 1489–1497, dez. 1990.

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

DELHAIZE, E. et al. Transgenic barley (*Hordeum vulgare* L.) expressing the wheat aluminium resistance gene (TaALMT1) shows enhanced phosphorus nutrition and grain production when grown on an acid soil. **Plant Biotechnology Journal**, v. 7, n. 5, p. 391–400, 2009.

DELHAIZE, E.; MA, J. F.; RYAN, P. R. Transcriptional regulation of aluminium tolerance genes. **Trends in Plant Science**, v. 17, n. 6, p. 341–348, jun. 2012.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum Toxicity Tolerance in Plants. **Plant Physiology**, v. 107, n. 2, p. 7, 1995.

DOGARA, A. M.; JUMARE, A. I. Origin, Distribution and Heading date in Cultivated Rice. **Internationa journal of plant biology and research**, v. 2, n. 1, p. 2–6, 2014.

DUONG, T. P.; DIEP, C. N. An inexpensive cultural system using ash for cultivation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) on acid clay soils. **Plant and Soil**, v. 96, n. 225–237, p. 225–237, 1986.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DO SOLO (CNPS). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA, E. B. DE P. A.-. **Laboratório de Agrometeorologia**. Disponível em: <agromet.cpact.embrapa.br>. Acesso em: 8 mar. 2018.

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

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

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

FAMOSO, A. N. et al. Development of a novel aluminum tolerance phenotyping platform used for comparisons of cereal aluminum tolerance and investigations into rice aluminum tolerance mechanisms. **Plant Physiology**, v. 153, p. 1678–1691, 2010.

FEDERACIÓN NACIONAL DE ARROCEROS. Revista Arroz. **FEDEARROZ**, v. 63, p. 56, 2015.

FERNANDES, M. S.; ROSSIELLO, R. O. P.; ARRUDA, M. L. R. Relações entre capacidade de troca de cátions de raízes e toxidez de alumínio em duas gramíneas forrageiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 1958, p. 631–637, 1984.

FERREIRA, R. DE P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. Toxidez de alumínio em culturas anuais: 1. **EMBRAPA Pecuária Sudeste, Documentos 63**, São Carlos, SP, p. 35, 2006.

FERREIRA, R. DE P.; SALGADO, L. T.; JORGE, H. D. Tolerância de cultivares de arroz ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 21, n. Foy 1974, p. 1257–1260, 1986.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
FAOSTAT. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

FOY, C. D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicity in acid soil. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 57–98.

FREIRE, L. R. et al. Efeito de alumínio nas raízes de arroz cultivado em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 22, n. 1965, p. 459–464, 1987.

FREITAS, F. A. DE et al. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 72–79, fev. 2006.

FURUKAWA, J. et al. An aluminum-activated citrate transporter in barley. **Plant and Cell Physiology**, v. 48, n. 8, p. 1081–1091, 2007.

HALLAUER, A. R. Evolution of plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 11, n. 1, p. 197–206, 2011.

HARTWIG, I. et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, n. 2, p. 219, 30 out. 2007.

HAUG, A.; FOY, C. E. Molecular aspects of aluminum toxicity. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 1, n. 4, p. 345–373, 1984.

HEDE, A. R.; SKOVMAND, B.; LÓPEZ-CESATI, J. Acid Soils and Aluminum Toxicity. **Application of physiology in wheat breeding**, n. 1995, p. 172–182, 2001.

HOEKENGA, O. A. et al. *AtALMT1*, which encodes a malate transporter, is identified as one of several genes critical for aluminum tolerance in Arabidopsis. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 25, p. 9738–9743, 20 jun. 2006.

HUANG, C. F. et al. A Bacterial-Type ABC Transporter Is Involved in Aluminum Tolerance in Rice. **The Plant Cell**, v. 21, p. 655–667, 2009.

HUANG, X. et al. A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice. **Nature**, v. 490, p. 497–501, 2012.

HUE, N. V.; AMIEN, I. Aluminum detoxification with green manures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n. 15–16, p. 1499–1511, 11 set. 1989.

IRRI, I. R. R. I. **Standard Evaluation System for Rice (SES)**. IRRI ed. Manila, Los Baños, Filipinas, v. 5, p. 55. 2013

ISMAIL, A. M.; THOMSON, M. J. Molecular breeding of rice for problem soils. **Root Genomics**, p. 318, 2011.

IUCHI, S. et al. Zinc finger protein *STOP1* is critical for proton tolerance in Arabidopsis and coregulates a key gene in aluminum tolerance. **The National Academy of Sciences of the USA**, v. 104, n. 23, p. 9900–9905, 2007.

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

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. New York: Springer-Verlag, 2002.

JONES, D. L. et al. Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 7, p. 1309–1318, 2006.

KHUSH, G. S. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. **Plant Molecular Biology**, v. 35, p. 25–34, 1997.

KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Apparent phytotoxicity of mononuclear hydroxy-aluminum to four dicotyledonous species. **Physiologia Plantarum**, v. 79, n. 1, p. 283–288, 1990.

KÖPPEN W, GEIGER R KLIMATE DER ERDE. **Gotha: Verlag Justus Perthes**. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LARSEN, P. B. et al. *ALS3* encodes a phloem-localized *ABC* transporter-like protein that is required for aluminum tolerance in Arabidopsis. **Plant Journal**, v. 41, n. 3, p. 353–363, 2005.

LEE, C. R. Influence of aluminum on plant growth and tuber yield of potatoes. **Agronomy Journal**, v. 63, n. 3, p. 363–364, 1971.

LIGABA, A. et al. The *BnALMT1* and *BnALMT2* genes from rape encode aluminum-activated malate transporters that enhance the aluminum resistance of plant cells. **Plant Physiology**, v. 142, n. 3, p. 1294–1303, 2006.

LIU, J. et al. Aluminum-activated citrate and malate transporters from the *MATE* and *ALMT* families function independently to confer *Arabidopsis* aluminum tolerance. **The Plant Journal**, v. 57, n. 3, p. 389–399, 2009.

MA, J. F.; HIRADATE, S. Form of aluminium for uptake and translocation in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). **Planta**, v. 211, n. 3, p. 355–360, 2000.

MA, J. F.; HIRADATE, S.; MATSUMOTO, H. High Aluminum Resistance in Buckwheat . I. Al-induced Specific Secretion of Oxalic Acid from Root Tips. **Plant Physiology**, v. 117, p. 745–751, 1998.

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

MA, J. F. et al. Internal detoxification mechanism of Al in Hydrangea. **Plant Physiology**, v. 113, n. 1, p. 1033–1039, 1997.

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

MAGALHÃES, A. M. DE; OLIVEIRA, A. C. DE. Arroz alimentando a humanidade há milênios. In: **Origem e evolução de plantas cultivadas**. 1ª ed. p. 185.

MAGALHAES, J. V. et al. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (*MATE*) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, v. 39, n. 9, p. 1156–1161, 2007.

MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods: a primer**. London: Chapman and Hall, 1988.

MARON, L. G. et al. Aluminum tolerance in maize is associated with higher *MATE1* gene copy number. **PNAS**, v. 110, n. 13, p. 5241–5246, 2013.

MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. **Plant and Soil**, v. 134, n. 1, p. 1–20, jul. 1991.

MARTINEZ, C. P. et al. Estado actual del mejoramiento del arroz mediante la utilización de especies silvestres de arroz en CIAT. **Agronomía Mesoamericana**, v. 9, n. 1, p. 10–17, 1998.

MASCARENHAS, H. A. A.; CAMARGO, C. E. DE O.; FALIVENE, S. M. P. Efeito do alumínio sobre o crescimento de raízes, peso seco da parte aérea e raízes de diferentes cultivares de soja. **Bragantia**, v. 43, n. 1, p. 191–200, 1984.

MATINS, C. E. et al. Seleção de genótipos de *Brachiaria ruziziensis* quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Ciências Agrárias**, p. 154–162, 2011.

MATSUMOTO, H. Cell Biology of Aluminum Toxicity and Tolerance in Higher Plants. **International Review of Cytology**, v. 200, p. 1–46, 2000.

MATSUMOTO, T. et al. The map-based sequence of the rice genome. **Nature**, v. 436, n. 7052, p. 793–800, 2005.

METALI, F.; SALIM, K. A.; BURSLEM, D. F. R. P. Evidence of foliar aluminium accumulation in local, regional and global datasets of wild plants. **New Phytologist**, v. 193, n. 3, p. 637–649, 2012.

MEURER, E. J. **Fundamentos da química do solo**. Ed. Evangraf. 6 ed, p 280. Porto Alegre, 2015

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Transformações bioquímicas e ciclos dos elementos no solo. In: UFLA (Ed.). **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: v. ed. 2, p.729

MORENO, N. S. **Estudio genómico de la tolerancia a suelos ácidos en cereales**. Universidad Complutense de Madrid, 2014.

MORENO-ALVARADO, M. et al. Aluminum Enhances Growth and Sugar Concentration, Alters Macronutrient Status and Regulates the Expression of NAC Transcription Factors in Rice. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 73, 14 fev. 2017.

MOUSTAKAS, M. et al. Aluminum toxicity effects on durum wheat cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 5, p. 627–638, 1992.

MUÑOZ, G.; GIRALDO, G.; DE SOTO, J. F. **Descriptorios varietales: arroz, frijol, maíz, sorgo**. Cali - Colombia : Centro Internacional de Agricultura Tropical: CIAT; 177, 1993.

NUNES, C. D. M. Doenças da Cultura de Arroz Irrigado. **EMBRAPA Clima Temperado**. Documentos 1516-8840, 360. Pelotas, RS, p. 83. 2013

FERREIRA, R. DE P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. Toxidez de alumínio em culturas anuais: 1. **EMBRAPA Clima Temperado, Documentos 63**, São Carlos, SP, p. 35, 2006.

OLIVEIRA, C. E. DE; CAMARGO, O. B. DE A.; SOUZA, D. M. DE. Diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva na tolerância de cultivares de arroz. **Bragantia**, v. 43, n. 2, p. 357–368, 1983.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. **Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - (FAO)**, p. 192, 2016.

PAN, W. L.; HOPKINS, A. G.; JACKSON, W. A. Aluminum inhibition of shoot lateral branches of Glycine max and reversal by exogenous cytokinin. **Plant and Soil**, v. 9, n. 120, p. 1–9, 1989.

PANDA, S. K.; BALUŠKA, F.; MATSUMOTO, H. Aluminum stress signaling in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 4, n. 7, p. 592–597, 31 jul. 2009.

PANDA, S. K. et al. Overexpression of alternative oxidase gene confers aluminum tolerance by altering the respiratory capacity and the response to oxidative stress in tobacco cells. **Molecular Biotechnology**, v. 54, n. 2, p. 551–563, 2013.

POSADA, F. C. Alteraciones inducidas por aluminio en el citoesqueleto de las plantas. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, 2002.

POSADA, F. C.; AVENDAÑO, O. E. A. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 1, n. 2, p. 246–257, 2007.

POSADA, F. C. Fundamentos fisiológicos, bioquímicos y anatómicos del estrés por aluminio en vegetales. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 28, n. 2, p.

19, 2001.

RAMAN, H.; GUSTAFSON, P. Molecular breeding of cereals for aluminum resistance. In: **Root Genomics**. Springer, 2011. p. 318.

ROSSIELLO, R. O. P. et al. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 30, n. 5, p. 633–638, 1995.

RYAN, P. R.; SHAFF, I. E.; KOCHIAN, L. V. Aluminum Toxicity in Roots. **Plant Physiology**, v. 99, p. 1193–1200, 1992.

RYAN, P. R. et al. The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 9–20, 1 jan. 2011.

SANTOS, M. DE L. M. Estudo dos mecanismos de tolerância ao alumínio e sua variabilidade genotípica em arroz (*Oryza sativa* L.). **EMBRAPA Arroz e Feijão**, p. 176. 1991

SAWAKI, Y. et al. STOP1 Regulates Multiple Genes That Protect Arabidopsis from Proton and Aluminum Toxicities. **Plant Physiology**, v. 150, n. 1, p. 281–294, 2009.

SERRA, M. R. **Estrategias de resistencia a aluminio en dos variedades de *Oryza sativa*: Exclusión vs Detoxificación**. Universitat Autònoma de Barcelona, 2016.

SILVA, L. M. DA et al. Sistema radicular de cultivares de arroz submetidas ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Agrarian**, v. 4, n. 13, p. 202–212, 2011.

SIVAGURU, M. et al. Control of the Response to Aluminum Stress. In: Nick P. (eds) **Plant Microtubules**. Plant Cell Monographs, vol 11. Springer, Berlin, Heidelberg. 2000

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

SOSBAI. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil / **XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS. 2014

SOSBAI. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil / **XXXI Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS. 2016

STEIN, J. C. et al. Genomes of 13 domesticated and wild rice relatives highlight genetic conservation, turnover and innovation across the genus *Oryza*. **Nature Genetics**, 2018.

SUTHIPRADIT, S.; EDWARDS, D. G. Effects of aluminium on tap-root elongation of soybean (*Glycine max*), cowpea (*Vigna unguiculata*) and greengram (*Vigna radiata*) grown in the presence of organic acids. **Plant and Soil**, v. 124, p. 233–237, 1990.

SWEENEY, M.; MCCOUCH, S. The complex history of the domestication of rice. **Annals of Botany**, v. 100, n. 5, p. 951–957, 2007.

TAHARA, K. et al. Identification of a Hydrolyzable Tannin, Oenothien B, as an aluminum-detoxifying ligand in a highly aluminum-resistant tree, *Eucalyptus camaldulensis*. **Plant Physiology**, v. 164, n. 2, p. 683–693, 2014.

TAIZ, L.; ZIEGLER, E. **Fisiologia Vegetal, 3ª edição**. Artmed. 3. ed. 2006

TAKEDA, K.; KUBOTA, R.; YAGIOKA, C. Blueing of sepal colour of *Hydrangea macrophylla*. **Phytochemistry**, v. 24, n. 6, p. 1207–1209, 1985.

TOMITA, A. et al. Genetic variation of root angle distribution in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Breeding Science**, v. 67, n. 3, p. 181–190, 2017.

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

UGA, Y. et al. Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. **Nature Publishing Group**, v. 45, n. 9, p. 1097–1102, 2013.

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

VICENTE, F. M. P.; ROSSIELLO, R. O. P.; PEREIRA, M. B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 49–54, 1998a.

WAGATSUMA, T.; KANEKO, M.; HAYASAKA, Y. Destruction Process of Plant Root Cells by Aluminum. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 33, n. 2, p. 161–175, jun. 1987.

WATANABE, T. et al. Distribution and chemical speciation of aluminum in the Al accumulator plant, *Melastoma malabathricum* L. **Plant and Soil**, v. 201, p. 165–173, 1998.

WEN, X. P. et al. Aluminum tolerance in a spermidine synthase-overexpressing transgenic European pear is correlated with the enhanced level of spermidine via alleviating oxidative status. **Environmental and Experimental Botany**, v. 66, n. 3, p. 471–478, 2009.

XIA, J. et al. Plasma membrane-localized transporter for aluminum in rice. **The National Academy of Sciences**, v. 107, n. 43, p. 18381–18385, 26 out. 2010.

YAMAJI, N. et al. A zinc finger transcription factor ART1 regulates multiple genes implicated in aluminum tolerance in rice. **The Plant Cell**, v. 21, n. 10, p. 3339–3349, 2009.

YANG, J. L. et al. Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex. **Plant Physiology**, v. 146, n. 2, p. 602–611, 2007.

YOKOSHO, K.; YAMAJI, N.; MA, J. F. An Al-inducible *MATE* gene is involved in external detoxification of Al in rice. **Plant Journal**, v. 68, n. 6, p. 1061–1069, 2011.

YOSHIDA, S. Physiological Aspects of Grain Yield. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 23, n. 1, p. 437–464, jun. 1972.

ZHANG, W.-H.; RENGEL, Z. Aluminium induces an increase in cytoplasmic calcium in intact wheat root apical cells. **AUSTRALIAN JOURNAL OF PLANT PHYSIOLOGY**, v. 26, n. 401, 1999.

ZHANG, X. BIN et al. Effect of Al in soil on photosynthesis and related morphological and physiological characteristics of two soybean genotypes. **Botanical Studies**, v. 48, n. 4, p. 435–444, 2007.