

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR
A TOXIDEZ POR ALUMÍNIO, MANGANÊS E BAIXA
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES**

Francisco Bruno Ferreira de Sousa

Engenheiro Agrônomo

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR
A TOXIDEZ POR ALUMÍNIO, MANGANÊS E BAIXA
DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES**

Francisco Bruno Ferreira de Sousa

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em agronomia (Ciência do Solo).

2018

Sousa, Francisco Bruno Ferreira de
S725t Tolerância de genótipos de cana-de-açúcar a toxidez por alumínio,
manganês e baixa disponibilidade de nutrientes / Francisco Bruno
Ferreira de Sousa. — Jaboticabal, 2018
xii, 56 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Jairo Osvaldo Cazetta
Banca examinadora: Samira Domingues Carlin Cavallari, César
Martoreli da Silveira
Bibliografia

1. Casa de vegetação. 2. Estresse abiótico. 3. *Saccharum spp.* 4.
Sistema alternativo de hidroponia. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.61

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Jaboticabal/SP - Karina Gimenes Fernandes - CRB 8/7418



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR A TOXIDEZ POR ALUMÍNIO, MANGANÊS E BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

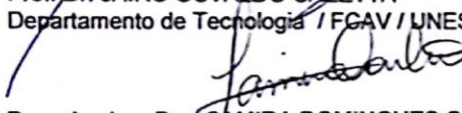
AUTOR: FRANCISCO BRUNO FERREIRA DE SOUSA

ORIENTADOR: JÁIRO OSVALDO CAZETTA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Pesquisadora Dra. SAMIRA DOMINGUES CARLIN CAVALLARI
Centro de Cana-IAC / Ribeirão Preto/SP



Prof. Dr. CESAR MARTORELLI DA SILVEIRA
Colégio Técnico Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 02 de agosto de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Francisco Bruno Ferreira de Sousa nasceu em Lago da Pedra - MA, Brasil em 30 de abril do ano de 1992, filho de Cleudiana Ferreira de Sousa. Possui formação no curso técnico em agropecuária pelo Centro de Formação Familiar por Alternância (CEFFA) - Manoel Monteiro, Lago do Junco - MA (2011). Graduado em Bacharel em Agronomia pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) no Câmpus de Ciências Agrárias e Ambientais de Chapadinha - MA (2016). Durante a graduação adquiriu experiências na área de Agronomia e Zootecnia com ênfase em forragicultura atuando nos seguintes temas: adubação mineral e orgânica de plantas forrageiras e ecofisiologia, publicando artigos e resumos referentes a essas áreas. Foi membro de Grupos de pesquisa e Extensão como: Grupo de pesquisa e extensão de Forragicultura e Pastagens no Maranhão (FOPAMA) da Universidade Federal do Maranhão, Projeto Abelha Nativa e Manejo Sustentável no Cerrado Maranhense (MASCEMA). Durante a graduação também teve a oportunidade de ser bolsista de Iniciação científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) durante dois anos e bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) durante um ano. Foi monitor nas disciplinas: Álgebra Linear, Introdução à estatística e Hidráulica Agrícola. Participou de organização de eventos relacionados à pesquisa e extensão como Dia de campo, simpósio, feiras, palestras, cursos e minicursos. Foi aluno do curso de mestrado do programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Jaboticabal sendo bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“O que adquire entendimento ama a sua alma; o que conserva a inteligência achará o bem” (**Provérbios 19:8**).

À minha querida família, e em especial à
minha Mãe pelo apoio, dedicação,
ensinamentos, conselhos e exemplo de
vida.

Dedico e Ofereço

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo o dom da vida, pelas bênçãos, livramentos e força concedida, pois, é graças a ele o que eu sou hoje.

À minha família pelo apoio sempre, em especial a minha mãe Cleudiana Ferreira de Sousa por ser a minha base e referência das coisas boas da vida. Aos meus irmãos Laíza de Sousa Ramos, Artemisia de Sousa Ramos, Milena de Sousa Ramos, Dario de Sousa Ramos, Leilson Sousa, Darielson de Sousa Ramos e ao meu padrasto Jurandir. Muito obrigado!

À minha digníssima esposa Sabrina Nascimento, por tudo que tem feito por mim e por estar sempre ao meu lado nos momentos bons e ruins dando força e me apoiando. Te amo amor!

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), por ter dado a oportunidade para realizar o curso, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

Ao professor e Amigo Dr. Jairo Osvaldo Cazetta, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e sabedoria. Meu muito obrigado!

Aos professores do curso de mestrado (Renato, Mara Cristina, Carlos Azania, Carlos Barbosa, Walter Maldonado, Wanderley), com quem tive a oportunidade de aprender um pouco mais durante as disciplinas cursadas. Obrigado!

Ao José Carlos, Técnico de Laboratório do Departamento de Tecnologia da UNESP, pelos ensinamentos e gentileza durante a realização do experimento. Meu muito obrigado!

Aos meninos da graduação (Gustavo, Beatriz e Carol), que me ajudaram muito com o experimento. Obrigado!

Aos meus colegas de curso do mestrado (Fernando, Marcilene, Márcia e Gelza) pelo companheirismo.

Aos colegas de Departamento (Diego, Laura e Leonardo) pela força com o experimento.

A todas as pessoas que não foram citadas direta ou indiretamente, com quem tive a oportunidade de conhecer e conviver em determinados momentos na Unesp e em Jaboticabal SP. Meu Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE FIGURAS	V
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Aspectos gerais da cultura	3
2. 2. Toxidez de Alumínio e Manganês	4
2. 3. Plantas tolerantes a fitotoxidez	5
2. 4. Mecanismos de tolerância ao Al^{3+}	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1. Ensaio para ajustes da metodologia	9
3.2. Experimento com 24 genótipos cultivados com e sem estresse ...	11
3.2.1. Local do ensaio e delineamento experimental	11
3.2.2. Genótipos utilizados	12
3.2.3. Caracterização dos tratamentos com e sem estresse	12
3.3. Variáveis analisadas	13
3.4. Análise estatística dos resultados	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5. CONCLUSÕES	34
6. REFERÊNCIAS	35

TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR A TOXIDEZ POR ALUMÍNIO, MANGANÊS E BAIXA DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

RESUMO - Pesquisas científicas focadas em identificar genótipos tolerantes a estresse abiótico são altamente desejáveis, pois, o uso desses genótipos diretamente no campo, ou indiretamente em processos de melhoramento genético, permite reduzir custos de manejo do solo, da cultura e perdas de produtividade. O objetivo desse trabalho foi determinar a tolerância de 24 genótipos de cana-de-açúcar sob elevados teores de Al^{3+} e Mn^{2+} , associado a baixa disponibilidade de nutrientes. Para trabalhar com elevado número de unidades experimentais, um novo sistema de hidroponia foi adaptado e testado neste trabalho. O ensaio foi instalado e conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado, num esquema fatorial 24x2, correspondendo a 24 genótipos, dois tratamentos (com e sem estresse), com quatro repetições, totalizando 192 unidades experimentais. No tratamento sem estresse, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa e no tratamento com estresse foi utilizada a mesma solução nutritiva com elevada acidez ($4,0 \pm 0,1$) e com apenas 5% da sua concentração original, além da elevada concentração de alumínio (60 mg L^{-1}) e manganês (700 mg L^{-1}) ambos na forma de cloreto. Os genótipos RB966928, RB855443, IACSP96-3060, SP81-3250, RB867515, CTC 21, RB965902 e IAC91-1099 foram os que tiveram suas características biométricas menos afetadas pelo estresse proposto e consequentemente foram considerados os mais tolerantes. Por outro lado, os genótipos RB965917, CTC 15, CTC17, RB855536, CTC 2, CTC 20 e CTC99-1906 foram os mais sensíveis ao estresse. Entre as variáveis o sistema radicular foi o mais afetado pelo estresse sendo que a maioria dos genótipos apresentaram mais de 70% de redução da biomassa da raiz. E não houve relação entre o nível de tolerância dos genótipos com os ciclos de maturação precoce, médio e tardio.

Palavras-chave: Casa de vegetação, estresse abiótico, *Saccharum* spp., sistema alternativo de hidroponia

TOLERANCE OF SUGAR CANE GENOTYPES TO TOXICITY BY ALUMINUM, MANGANESE AND LOW AVAILABILITY OF NUTRIENTS

ABSTRACT – The scientific research focused on identifying and understanding abiotic stress-tolerant genotypes is highly desirable since their use directly in the field or indirectly in breeding processes may reduce costs of soil and crop management and productivity losses. This aim of this study was to determine the tolerance of 24 sugarcane genotypes under high contents of Al^{3+} and Mn^{2+} associated with the low availability of nutrients. In order to work with a great number of experimental unities, a new way of hidroponic method was adapted and tested in this research. The experiment was carried out in a greenhouse in a completely randomized design, in a 24×2 factorial scheme, consisting of 24 genotypes, two treatments (with and without stress), and four replications, totaling 192 experimental units. In the treatments without stress, plants were grown in a complete nutrient solution whereas in the treatments with stress, a nutrient solution with a high acidity (4.0 ± 0.1) and only 5% of its original concentration, as well as a high concentration of aluminum (60 mg L^{-1}) and manganese (700 mg L^{-1}), was used, both in the form of chloride. The genotypes RB966928, RB855443, IACSP96-3060, SP81-3250, RB867515, CTC 21, RB965902 and IAC91-1099 were those that had their biometric characteristics less affected by the proposed stress and consequently were considered the most tolerant. genotypes RB965917, CTC 15, CTC17, RB855536, CTC 2, CTC 20, and CTC99-1906 were identified as the most sensitive to stress. Among the variables, the root system was the most affected by stress, with most genotypes showing more than 70% reduction in root biomass. And there was no relationship between the tolerance level of the genotypes with the cycles of early, middle and late maturation.

Keywords: Greenhouse, abiotic stress, *Saccharum* spp., hidroponic alternative system

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação dos Genótipos e classificação quanto ao ciclo de maturação.	12
Tabela 2 - Médias e diferença mínima significativa (DMS 5%) das características biométricas, obtidas nos sistemas hidropônico e sistema alternativo de hidroponia.	16
Tabela 3 - Análise de Variância para Efeitos Principais e Interação para todas as variáveis com os dados originais.....	18
Tabela 4 - Análise de Variância para Efeitos Principais e Interação para todas as variáveis com os dados relativizados.	19
Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Person entre as variáveis biométricas de cana-de-açúcar avaliadas sob tratamento com estresse.	20
Tabela 6 - Autovalores e Percentual de Variação Explicada pelos quatros primeiros componentes principais das variáveis biométricas dos 24 genótipos sob tratamento com estresse.	24
Tabela 7 - Matriz fatorial determinada pelo método de rotação ortogonal Varimax. .	25
Tabela 8 - Comparação de médias dos genótipos no tratamento com estresse, com os dados transformados em porcentagem para variáveis biométricas pelo teste de Scott & Knott a 5%.	27
Tabela 9 - Comparação de médias dos genótipos no tratamento com estresse, com os dados transformados em porcentagem para variáveis biométricas da parte aérea pelo teste de Scott & Knott a 5%.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Minitolete de cana-de-açúcar contendo uma gema (A), e mudas germinadas em copos de plásticos contendo areia lavada e peneirada (B).	10
Figura 2 - Mudas selecionadas quanto a sanidade e homogeneidade (A) e mudas expostas aos tratamentos (B).	10
Figura 3 - Medições sendo feitas referente ao diâmetro do colmo (A), altura do colmo (B) e índice de cor verde (C).	13
Figura 4 - Amostras sendo pesadas para a determinação da massa seca fresca (A) e estufa de circulação forçada de ar utilizada para determinação de massa seca (B). 14	
Figura 5 - Valores de massa seca da parte aérea e radicular do genótipo IACSP95-5000 submetido a doses de Al^{3+} (A) e diferentes concentrações da solução nutritiva (B).	17
Figura 6 - Biplot da distribuição da nuvem dos genótipos e variáveis pela análise de componentes principais (A), Análise de agrupamento não hierárquica obtida pelo método K-means (B). SP91-1049(1), RB855443(2), RB966928(3), RB965902(4), RB965917(5), CTC 9(6), CTC17(7), CTC 21(8), SP81-3250(9), IAC91-1099(10), IACSP95-5094(11), IACSP96-3060(12), CTC 2(13), CTC 20(14), CTC 24(15), CTC99-1906(16), SP83-2847(17), SP80-3280(18), IACSP95-5000(19), CTC 6(20), CTC 15(21), RB855536(22), RB867515(23), RB935744(24). Massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro do colmo (DC), altura da planta inteira (APL), peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar (AF) e altura do colmo (AC), volume radicular (VR), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR), número de folhas vivas (NFV) e número de folhas mortas (NFM) e índice de cor verde (ICV).	22
Figura 7 - Minitoletes de colmo de cana-de-açúcar contendo uma gema para produção de mudas.	26
Figura 8 - Sistema radicular de plantas de cana-de-açúcar submetidas aos tratamentos com estresse e sem estresse.	29
Figura 9 - Diferença no teor de pigmentos nas folhas de plantas de cana-de-açúcar submetidas aos tratamentos com estresse (A) e sem estresse (B)	30

1. INTRODUÇÃO

Dada à demanda crescente dos mercados interno e externo por combustíveis renováveis, açúcar e bioenergia, a cana (*Saccharum* spp.) tem se tornado cada vez mais importante no cenário nacional (Unica, 2017). Constituindo atualmente junto com seus derivados a segunda maior fonte de energia primária na matriz energética brasileira (Maia et al., 2018).

Em decorrência disso, nos últimos anos tem ocorrido grande expansão do cultivo da cana-de-açúcar no país (Goldfray et al., 2010; Caldarelli e Gilio, 2018). Com tal expansão, essa cultura avançou para as regiões do oeste do estado de São Paulo e áreas de Cerrado brasileiro. Essas regiões são caracterizadas por solos ácidos, com elevados teores de elementos tóxicos como alumínio (Al), manganês (Mn) e deficiência generalizada de nutrientes (Sousa et al., 2007; Brito, 2014).

O estresse causado pelo Al^{3+} está entre os mais significativos para a cultura prejudicando principalmente o desenvolvimento do sistema radicular, refletindo em baixa absorção de água e nutrientes, com consequente redução do crescimento e desenvolvimento das plantas (Chen et al., 2010; Silva et al., 2010; Oliveira, 2012).

Pesquisas científicas focadas em identificar genótipos tolerantes a essas condições são altamente desejáveis pois, o uso desses genótipos diretamente no campo, ou indiretamente em processos de melhoramento genético, permite reduzir custos de manejo do solo, da cultura e perdas de produtividade com reflexos no aumento e estabilidade do rendimento agrícola e industrial (Too et al., 2014).

Quando não existem fatores limitantes de clima e solo, a cana-de-açúcar desenvolve grande parte de suas raízes metabolicamente ativas desde a superfície até cerca de um metro de profundidade, podendo atingir até dois metros no solo (Luchiari Juníour, 1986). Entretanto, mesmo corrigindo e fertilizando a camada arável, as características químicas desfavoráveis permanecem no solo de subsuperfície, agindo como verdadeira barreira química que limita o desenvolvimento das raízes em profundidade (Raij, 2011).

Considerando que as plantas são rotineiramente sujeitas a interação de diferentes estresses abióticos, é coerente considerar que nessas pesquisas os genótipos sejam submetidos ao efeito combinado desses estresses (Carlin et al., 2012). No entanto, a maioria das pesquisas com proposição de avaliar a tolerância de genótipos à estresses abióticos, se limitam a estudar um fator de cada vez, (Fonseca Junior et al., 2014; Maia et al., 2018). Tais pesquisas são muito importantes, mas parece temeroso usar esses resultados para indicar genótipos para ambientes limitantes como os das áreas de expansão da cultura.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo determinar a tolerância relativa de 24 genótipos de cana-de-açúcar sob elevados teores de Al^{3+} e Mn^{2+} , associado a baixa disponibilidade de nutrientes, bem como verificar se existe variabilidade genética relacionada a esse estresse conjunto, se existe relação da tolerância com o ciclo de maturação (precoce, médio e tardio) e determinar quais os possíveis genótipos tolerantes e susceptíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos gerais da cultura

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) possui grande importância econômica e social para o Brasil. É considerada uma das melhores opções para a produção de etanol, açúcar e bioenergia devido à sua elevada capacidade produtiva de matéria seca nas condições brasileiras, especialmente nas regiões aonde vinha sendo tradicionalmente cultivada (Silva et al., 2007; Meneguetti, 2010). Por isso, tem se buscado melhorar ainda mais a produtividade, a eficiência, a lucratividade e a sustentabilidade dos processos produtivos (Benett et al., 2012), o que tem colocado o Brasil na frente de países como Índia, China e Austrália (MAPA, 2012).

No entanto, a elevada demanda vem promovendo a expansão da cultura para regiões de clima e solo menos favoráveis (Carlin e Santos, 2009; Goldfray et al., 2010), o que está exigindo o desenvolvimento de mais pesquisas com os genótipos existentes, tecnologia de cultivo e novas variedades (Silva, 2015). Essas condições de solos com características desfavoráveis não são incomuns. Estimativas revelam que, no mundo, quase metade das terras aráveis e potencialmente utilizáveis para a produção de alimentos e de biomassa são ácidas e, portanto, sujeitas à toxicidade de elementos como Al^{3+} e Mn^{2+} (Ma, 2007; Guo et al., 2007; Zhang et al., 2007; Giannkoula et al., 2008), bem como deficiência de nutrientes (Cambri, 2004; Sousa et al., 2007).

Essas características coincidem com as áreas onde o avanço da agricultura no Brasil tem ocorrido principalmente em direção às áreas de cerrado. Tais áreas têm solos com boas propriedades físicas, boa drenagem e têm relevo em condições favoráveis à mecanização (Oliveira, 2012), porém, 89% desses solos são distróficos, com propriedades químicas inadequadas como baixa CTC (capacidade de troca catiônica), elevada acidez, elevados teores trocáveis de Al^{3+} e Mn^{2+} e deficiência generalizada de nutrientes minerais para as plantas (Korndörfer, 2004; Sousa et al., 2007; Rodrigues, 2013).

2. 2. Toxidez de Alumínio e Manganês

O alumínio e o manganês em altas concentrações são os elementos que mais limitam o crescimento das plantas nos solos ácidos brasileiros. Quanto à toxicidade por Al^{3+} vários efeitos são descritos na literatura. Quando o pH do solo é $< 5,5$, e na presença do Al^{3+} , o mesmo solubiliza-se na solução do solo, tornando-se potencialmente tóxico para as plantas (Kochian, 1995).

Mesmo que as plantas encontrem no solo as quantidades necessárias de nutrientes para seu desenvolvimento, o crescimento e, conseqüentemente, a produtividade da cultura não alcança seu potencial quando estão em ambiente com concentrações tóxicas de alumínio. Dessa forma, o Al^{3+} prejudica o desenvolvimento das plantas tanto pelo efeito deletério direto sobre os tecidos vivos das plantas em especial das raízes (Brito, 2014; Maia et al., 2018), como pelo efeito indireto dificultando a absorção de água e nutrientes pelas raízes intoxicadas (Chen et al., 2010; Silva et al., 2010).

As extremidades das raízes são as mais afetadas e sua resposta ao Al^{3+} ocorre de maneira bem rápida o que indica que num primeiro momento o Al^{3+} inibe a expansão e alongação das células das raízes, e depois a divisão celular também passa a ser inibida (Kochian, 1995; Oliveira, 2012; Ecco et al, 2014). Em função da rápida reatividade do Al^{3+} , as injúrias podem ocorrer na parede celular, na membrana plasmática, no citoesqueleto e até no núcleo celular (Hartwig et al., 2007). A principal característica nas raízes afetadas é a inibição do seu crescimento tornando-se mais curtas e grossas, suas extremidades são as mais afetadas com ausências de ramificações terminais.

Elevada disponibilidade de Al^{3+} no solo também pode induzir deficiência de nutrientes devido à interferência do Al^{3+} nos processos solubilização/precipitação na solução, de absorção pelas raízes, transporte e uso destes nutrientes dentro da planta (Barceló e Poschenrieder, 2002).

No que se refere ao Mn^{2+} , deve se destacar que grande parte das áreas agrícolas brasileiras possui solos oriundos de basalto e outras rochas de origem com

elevados teores de Mn^{2+} , sendo, portanto, de grande interesse que as plantas cultivadas apresentem tolerância à elevados teores desse elemento (Camargo, 1995). Com sua ocorrência predominantemente, pedogenética, os teores de Mn^{2+} disponíveis podem variar de 3 a 190 mg/dm³ em solos brasileiros (Manzini et al., 2010).

O Mn^{2+} é um micronutriente essencial às plantas, necessário, por exemplo, na ativação de enzimas do processo fotossintético e outras ações metabólicas (Buchel et al., 1999). Porém, se absorvido em quantidades excessivas torna-se altamente tóxico (Doyle et al., 2003; Prado, 2008, Guirra et al., 2011).

A toxidez de manganês ocorre em solos ácidos, devido ao aumento de sua solubilidade em meios com pH ao redor de 5,0. Isso ocorre especialmente quando o material de origem do solo é rico em manganês e em condições redutoras (Foy et al., 1978). A concentração crítica de Mn^{2+} no tecido vegetal necessária para produzir sintomas de toxidez varia entre as espécies e até mesmo entre os cultivares de uma mesma espécie (Marschner, 1995).

Os principais sintomas associados à toxidez de Mn^{2+} incluem alterações nas paredes celulares, necrose do caule e das folhas, diminuição da capacidade fotossintética da planta, crescimento retardado, encarquilhamento das folhas, requeima das pontas de folhas e flores (Foy, 1984; Lindon et al., 2004). Em alguns casos pode também apresentar salpicos marrons em folhas maduras devido à presença de polifenóis oxidados, além de provocar a indução da deficiência de outro micronutriente como o ferro (Ponnamperuma, 1985).

Nesse sentido, são importantes as pesquisas para avaliar os efeitos da toxicidade de Mn^{2+} no crescimento e desenvolvimento das plantas e buscar identificar plantas tolerantes quando estas têm possibilidade de serem cultivadas em ambientes com teores elevados deste micronutriente.

2. 3. Plantas tolerantes a fitotoxidez

Sabe-se que através de algumas técnicas de melhoramento vegetal e/ou de manejo do solo os problemas de toxidez por elementos como o Al^{3+} e Mn^{2+} podem ser

melhor enfrentados (Lopes, 1984; Maia et al., 2018). A prática da calagem é a forma mais comum para solucionar esses problemas na camada superficial do solo. Por isso, essa prática resolve o problema de forma parcial, pois, o calcário tem mobilidade limitada e sua ação não se estende nas camadas mais profundas do solo (Cambri, 2004; Oliveira, 2012).

O gesso agrícola tem sido apontado como sendo outra opção, porém, além de não possuir efeito corretivo, o gesso tem sofrido várias restrições de ordem econômica e técnica (Costa, 2011; Oliveira, 2012). Por isso, a busca por plantas tolerantes ao efeito de estresse abiótico como por elementos tóxicos tem sido considerada uma ferramenta adicional para aumentar a produção agrícola em solos ácidos (Ecco et al., 2014; Brito, 2014; Geronimo, 2014), pois plantas tolerantes às citadas condições desfavoráveis se desenvolvem mais nas camadas profundas do solo.

Variedades mais produtivas e tolerantes a solos ácidos e capazes de emitir raízes no subsolo com elevados níveis de Al^{3+} podem ter relação com diversos fatores intrínsecos a cada genótipo (Ma et al., 2001). Fatores estes, que possivelmente podem estar associados com características tais como o tipo de maturação (precoce, médio e tardio) e a capacidade de brotamento, enraizamento e desenvolvimento inicial das plantas, que precisam ser melhor estudados. A grande capacidade de brotação, por exemplo, é de grande importância para produzir plantas vigorosas e com mais capacidade de se adaptar a área de cultivo (Silva et al., 2004), principalmente quando essa fase envolve condições ambientais desfavoráveis (Casagrande, 1991). Além de fatores ambientais, fitotécnicos e fitossanitários (Serafim et al., 2012; Magalhães et al., 2015), o desenvolvimento das gemas presentes nos toletes de plantio também pode depender bastante de características intrínsecas de cada genótipo.

2. 4. Mecanismos de tolerância ao Al^{3+}

Muitos estudos têm sido publicados a respeito do mecanismo de tolerância de diversas culturas ao alumínio tóxico presente nos solos.

No entanto, tais mecanismos ainda não foram esclarecidos e podem variar entre espécies e cultivares (Oliveira, 2012; Maia et al., 2018). A cana-de-açúcar

quando comparada com outras espécies vegetais como milho (*Zea mays*) e arroz (*Oriza sativa*) apresenta menor sensibilidade ao alumínio (Oliveira, 2012). Entretanto, na própria cana-de-açúcar já foi relatado que existe diferença entre espécies, Landel (1989) em sua pesquisa cita que a *Saccharum officinarum* é mais tolerante ao Al do que *Saccharum spontaneum*.

O conceito de tolerância ao Al^{3+} há muito esteve associado com a capacidade de manter a divisão e alongamento celular, e a viabilidade dos tecidos meristemáticos, mesmo sob condições de estresse para a formação de novos tecidos (Foy et al., 1984). E até hoje tem sido bastante citado pela literatura (Ecco et al., 2014; Maia et al., 2018).

As plantas apresentam basicamente duas classes principais de mecanismos de resistência ao Al^{3+} tóxico. Aqueles que atuam no sentido de impedir a entrada do Al^{3+} pela raiz e aqueles que permitem a planta acumular o Al^{3+} em locais específicos na planta. Estes processos têm sido alvo de inúmeros trabalhos científicos (Kochian, 1995; Ma e Furukawa, 2003) com várias culturas como milho (Piñeros et al. 2002), cevada (Ma et al., 2004), soja (Silva et al., 2001) e sorgo (Magalhaes, 2002).

Entre esses mecanismos a exsudação de ácidos orgânicos liberado pela raiz atualmente é considerada um dos principais mecanismos relacionados à tolerância ao Al^{3+} , de acordo com a literatura existente sobre a atuação desses ácidos (malato, citrato e oxalato) após serem liberados formam a complexação do Al^{3+} em formas não tóxicas (Delhaize e Randall, 1993). Outro mecanismo também tem sido citado e refere-se à capacidade de algumas espécies em acumular elevadas quantidades de Al^{3+} em seus tecidos, como meio de desintoxicação interna do Al^{3+} (Hartwig, 2007; Maia et al., 2018).

Podem ser citados vários outros mecanismos como exsudação de compostos fenólicos e incremento do pH da rizosfera via influxo de H^+ . Esse último processo se baseia no fato de que se a raiz pode incorporar o íon H^+ e aumentar o pH ao redor do ápice radicular, isto reduziria a atividade do Al^{3+} tóxico na rizosfera (Hartwig, 2007). No entanto, trabalhos mostraram que este processo não foi efetivamente comprovado

(Taylor, 1991; Dodge e Hiatt, 1992). O que deixa claro que mais pesquisas são necessárias para uma melhor definição desses processos.

Independentemente de qual o mecanismo a planta exerce, a utilização de genótipos tolerantes ao Al^{3+} nas novas áreas de plantio, torna-se a maneira mais econômica de contornar os problemas causados pela presença de elementos indesejáveis no solo (Peixoto et al., 2007; Ecco, 2014). De acordo com Peixoto et al. (2007), a toxidez de Al^{3+} pode ser observada por diversos sintomas no sistema radicular e na parte aérea. Portanto, o uso de parâmetros morfofisiológicos tem sido frequente nas pesquisas atuais para identificação de genótipos tolerantes (Oliveira, 2012; Ecco et al., 2014, Brito, 2014; Maia et al, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Ensaios para ajustes da metodologia

O experimento foi desenvolvido na Unesp - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP (latitude 21° 15' 22"S e longitude 48° 18' 58" WG) e altitude de 575 m, no período de 04 de abril a 23 de julho de 2017.

Para a realização desse trabalho a solução nutritiva foi fornecida por meio do sistema descrito por Dantas et al. (2001), com adaptações para cana-de-açúcar. Vale ressaltar que o termo adaptação se refere apenas as mudanças feitas com a quantidade e o tamanho dos recipientes adotados por Dantas et al. (2001), de modo que, nesse estudo foram empregados recipientes com capacidade maior permitindo o desenvolvimento da muda da cana-de-açúcar. Para testar a eficiência do sistema alternativo, definir a dose de Al^{3+} e a concentração da solução nutritiva fez-se necessário a realização de alguns ensaios preliminares.

Nesse sentido foram realizados três ensaios preliminares. Um com o objetivo de verificar a eficiência do sistema descrito por Dantas et al. (2001) que foi adaptado e utilizado nesse estudo para o fornecimento da solução nutritiva. Para testar a eficiência desse sistema utilizou-se como referência o sistema hidropônico tradicional. Os outros dois ensaios foram conduzidos para testar qual a dose de Al^{3+} mais adequada para seleção de genótipos nesse sistema e qual a melhor força iônica da solução nutritiva.

Todos os ensaios foram realizados em casa de vegetação sob as mesmas condições experimentais e com o mesmo genótipo (IACSP 95-5000). A IACSP 95-5000 foi escolhida por ser um cultivar indicada para ambientes favoráveis (A1 – C1) sendo, portanto, sensível a solos ácidos e pobres (Chaves et al., 2015).

A obtenção das mudas foi feita a partir de minitoletes (3 cm) contendo uma gema cada um (Figura 1A), seguindo os métodos descritos em Carlin et al. (2012). Após cortados, os minitoletes foram imediatamente plantados em recipientes de

plástico com capacidade de 500 ml, com furos na parte inferior, contendo areia lavada e peneirada (Figura 1B).

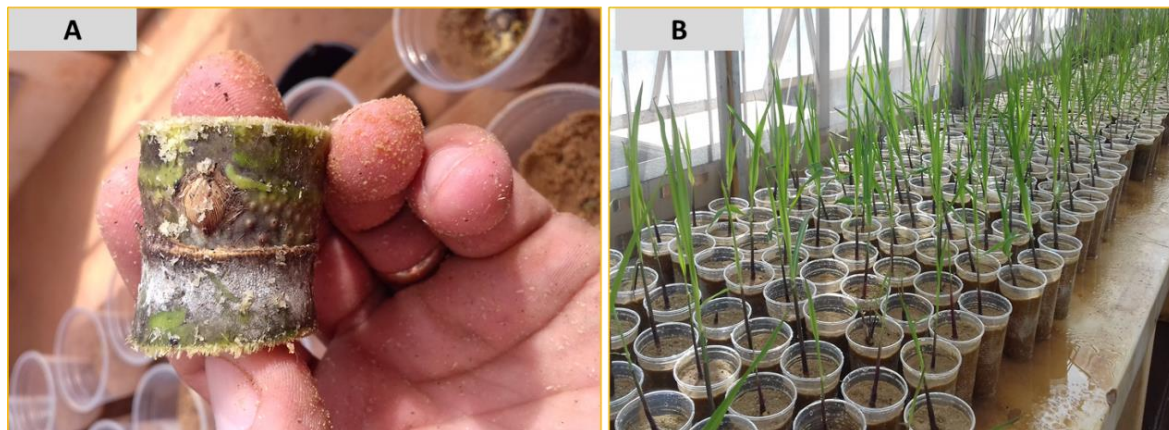


Figura 1 - Minitoplete de cana-de-açúcar contendo uma gema (A), e mudas germinadas em copos de plásticos contendo areia lavada e peneirada (B).

As mudas foram cultivadas sem qualquer restrição hídrica, durante 28 dias. Após este período, foram selecionadas quanto à sanidade e homogeneidade e transplantadas para potes de plástico nas dimensões 15x9x9 cm com capacidade de 1 litro e contendo 700 ml de areia lavada (Figura 2A) e, só então, postas em cada ensaio (Figura 2B). Cada pote teve o fundo perfurado para facilitar a absorção da solução nutritiva.

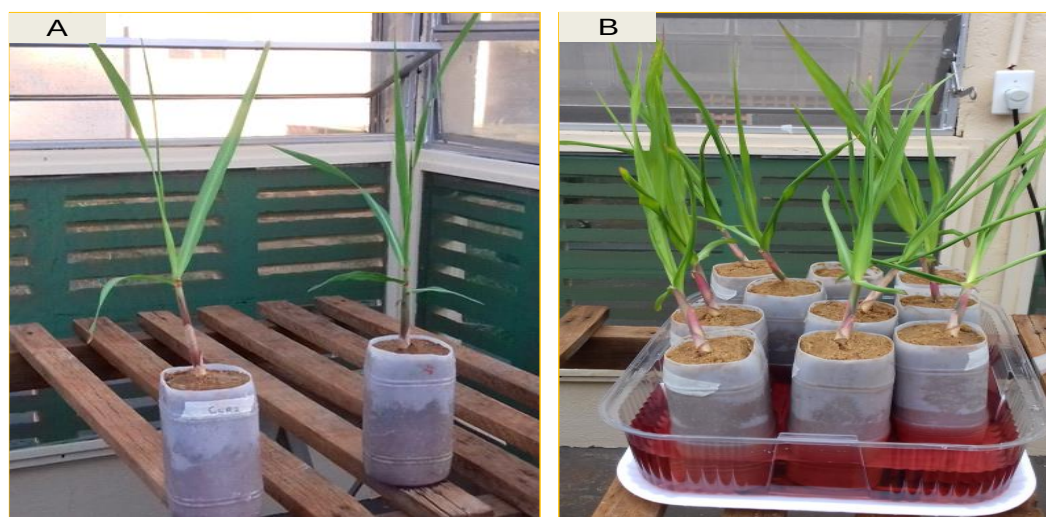


Figura 2 - Mudas selecionadas quanto a sanidade e homogeneidade (A) e mudas expostas aos tratamentos (B).

O primeiro ensaio foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com dois tratamentos compostos pelos sistemas hidropônico tradicional e o sistema alternativo, com 10 repetições. Em ambos os sistemas, as mudas foram cultivadas em solução nutritiva completa (Furlani e Furlani, 1998), contendo os seguintes nutrientes: 3,1 ml L⁻¹ Ca(NO₃)₂ 1,64 mol L⁻¹, 3,1 ml L⁻¹ NH₄NO₃ 0,42 mol L⁻¹, 2,2 ml L⁻¹ KCl 0,25 mol L⁻¹, 2,2 ml L⁻¹ K₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹, 2,2 ml L⁻¹ KNO₃ 0,24 mol L⁻¹, 1,6 ml L⁻¹ Mg(NO₃)₂ 0,96 mol L⁻¹, 0,2 ml L⁻¹ KH₂PO₄ 0,13 mol L⁻¹, 0,6 ml L⁻¹ FeDDH 0,16 mol L⁻¹, 0,6 ml L⁻¹ MnCl₂ 0,08 mol L⁻¹, 0,6 ml L⁻¹ H₃BO₂ 0,03 mol L⁻¹, 0,6 ml L⁻¹ ZnSO₄ 0,005 mol L⁻¹, 0,6 ml L⁻¹ CuSO₄ 0,001 mol L⁻¹, e 0,6 ml L⁻¹ Na₃MoO₂ 0,001 mol L⁻¹ com pH de 5,5 ± 0,1.

Para a adaptação do sistema descrito por Dantas et al. (2001) utilizou-se uma bandeja nas dimensões de 42x36x11 cm, onde foram alocados 10 potes de plástico. Em ambos os sistemas foi mantida uma lâmina de 5 cm da solução em cada bandeja que era trocada a cada três dias.

Para os outros dois ensaios o delineamento foi o mesmo, mudando apenas os tratamentos. No caso do Al³⁺, os tratamentos consistiram em 8 concentrações de Al³⁺ na solução nutritiva (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 mg L⁻¹), com 3 repetições. Quanto a força iônica da solução nutritiva associada à toxidez do Al³⁺ e Mn²⁺, foram testadas as concentrações de 0, 5, 10, 15 e 20 % da solução completa (Furlani e Furlani, 1998) mantendo fixas as doses de 60 e 700 mg L⁻¹ de Al³⁺ e Mn²⁺ respectivamente, com 4 repetições.

3.2. Experimento com 24 genótipos cultivados com e sem estresse

3.2.1. Local do ensaio e delineamento experimental

O ensaio foi instalado e conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado, num esquema fatorial 24x2, correspondendo a 24 genótipos, dois tratamentos (com e sem estresse), com quatro repetições, totalizando 192 unidades experimentais. As mudas utilizadas nesse experimento foram obtidas conforme mencionado anteriormente.

3.2.2. Genótipos utilizados

Os 24 genótipos usados nesta pesquisa pertencem a três grupos distintos quanto ao ciclo de maturação previamente identificados como precoce, médio e tardio (Tabela 1). Essas plantas foram cultivadas numa mesma área da Fazenda Experimental da FCAV -Unesp - Câmpus de Jaboticabal, onde eram submetidas às mesmas condições de manejo, clima e solo.

Tabela 1 - Identificação dos Genótipos e classificação quanto ao ciclo de maturação.

CICLOS DE MATURAÇÃO DOS GENÓTIPOS					
Precoce		Médio		Tardio	
Nº	Genótipo	Nº	Genótipo	Nº	Genótipo
1	SP91-1049	9	SP81-3250	17	SP83-2847
2	RB855443	10	IAC91-1099	18	SP80-3280
3	RB966928	11	IACSP95-5094	19	IACSP95-5000
4	RB965902	12	IACSP96-3060	20	CTC 6
5	RB965917	13	CTC 2	21	CTC 15
6	CTC 9	14	CTC 20	22	RB855536
7	CTC17	15	CTC 24	23	RB867515
8	CTC 21	16	CTC99-1906	24	RB935744

Fontes: Instituto Agronômico - IAC (2017), RIDESA, (2010), Centro de Tecnologia Canavieira - CTC (2017).

3.2.3. Caracterização dos tratamentos com e sem estresse

Para o tratamento sem estresse, as plantas foram cultivadas em solução nutritiva completa (Furlani e Furlani, 1998) com pH de $5,5 \pm 0,1$. Quanto ao tratamento com estresse foi utilizada a mesma solução nutritiva com elevada acidez ($4,0 \pm 0,1$) e com apenas 5% da sua concentração original, além da elevada concentração de alumínio (60 mg L^{-1}) e manganês (700 mg L^{-1}), ambos na forma de cloreto. Para o estabelecimento da força iônica da solução nutritiva (5%) e a dose de alumínio (60 mg L^{-1}) tomou-se como base os resultados dos ensaios preliminares e a concentração de manganês (700 mg L^{-1}) foi definida com base em informações da literatura (Benett, 2012).

O nível da solução era corrigido diariamente pela adição de água destilada quando também foi corrigido o pH. A cada três dias era realizada a limpeza das bandejas e substituídas as soluções e nessas ocasiões todas as bandejas eram mudadas de posição aleatoriamente, bem como as mudas em cada bandeja, de modo a manter todas as unidades experimentais num esquema inteiramente casualizado.

3.3. Variáveis analisadas

Decorridos 50 dias da submissão das mudas aos tratamentos com e sem estresse, foram realizadas as avaliações não destrutivas: número de folhas vivas, número de folhas mortas, altura de planta, área foliar, altura do colmo e diâmetro do colmo (Figura 3). Foram consideradas folhas vivas aquelas completamente abertas e com pelo menos 20% de área verde. Quanto as folhas mortas foram consideradas aquelas que apresentavam menos 20% de área verde.



Figura 3 - Medições sendo feitas referente ao diâmetro do colmo (A), altura do colmo (B) e índice de cor verde (C).

A área foliar foi determinada seguindo metodologia proposta por Hermann e Câmara, (1999), de acordo com a equação $AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2)$, onde: AF= área foliar (cm²); C = comprimento da folha estudada (cm); L = largura da folha estudada (cm); 0,75 = fator de forma; N = número de folhas totalmente aberta e com pelo menos 20% de área verde e 2 = fator de correção.

A estimativa do conteúdo de clorofila foi realizada na região mediana das folhas, lateralmente a nervura central, com o auxílio do clorofilômetro modelo CCM-200 (Opti-Scienses, Inc.), obtendo-se os dados de índice de cor verde da folha (ICV), sendo realizadas três medições na folha +1 de cada planta (Figura 3 C).

Após colhidas todas as plantas foram divididas em partes aérea, raízes e tolete. O volume radicular das plantas foi determinado mergulhando as raízes numa proveta com água destilada e medindo-se o volume deslocado. A seguir, todas as amostras foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados, pesadas para a determinação da massa fresca (Figura 4A), e em seguida colocadas em estufa de circulação forçada de ar regulada para 65 ± 5 °C até atingir peso constante, para a determinação da massa seca (Figura 4B).

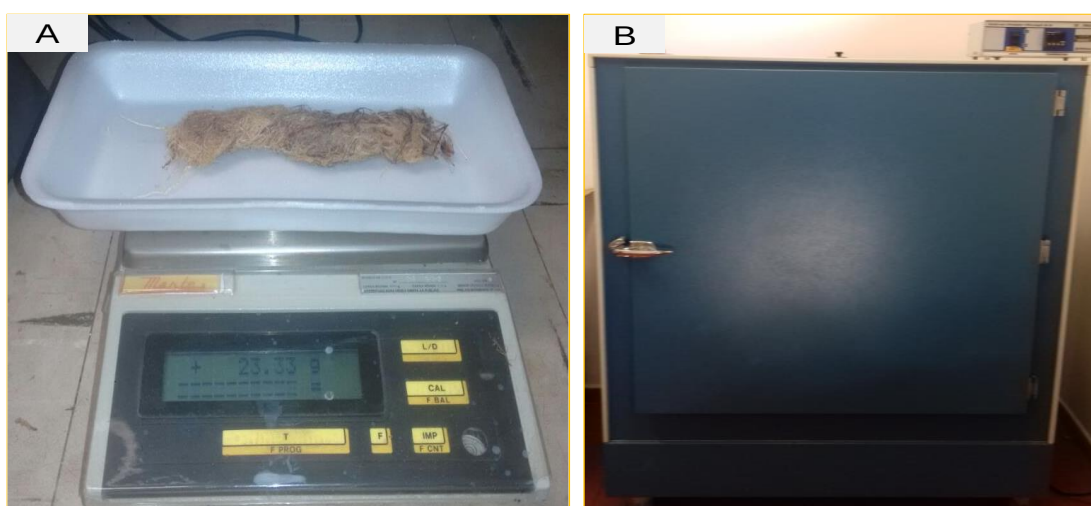


Figura 4 - Amostras sendo pesadas para a determinação da massa seca fresca (A) e estufa de circulação forçada de ar utilizada para determinação de massa seca (B).

3.4. Análise estatística dos resultados

Os resultados dos ensaios preliminares foram submetidos à análise de variância pelo teste F e comparação das médias pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. O ensaio testando as concentrações de Al^{3+} , quando detectado efeito significativo, foi aplicada a análise por regressão polinomial, usando o programa AGROESTAT (Barbosa e Maldonado Junior, 2015).

No experimento principal realizou-se, inicialmente, uma análise de variância (Teste F) dos dados originais no esquema fatorial 24x2 (genótipos x tratamento), e comparação das médias pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5%, também com auxílio do Programa AGROESTAT (Barbosa e Maldonado Junior, 2015).

Para observar a similaridade entre os genótipos realizou-se uma análise exploratória multivariada, com auxílio do programa Statistica 7.0 (StatSoft. Inc, 2004). Para diferenciar os grupos dos genótipos e suas relações com as variáveis estudadas realizou-se a análise pelo método não hierárquico por agrupamentos de k-médias ("k-means clustering").

Além disso, para identificar os processos que responderiam pelas maiores variabilidades das variáveis medidas foi aplicada a análise de fatores. Como técnica para extrair os fatores foi usada a análise dos componentes principais (Seal, 1964; Jeffers, 1978), realizada a partir da matriz de correlação entre as variáveis. Foram selecionados os fatores com autovalores ≥ 1 adotando o critério de Kaiser (1958). E para facilitar a interpretação dos resultados foi utilizado o método de rotação ortogonal Varimax (Kaiser, 1958; Hoffmann, 1992).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema alternativo de cultivo empregado nesse estudo proporcionou resultados semelhantes ($P>0,05$) do sistema hidropônico tradicional, em todas as variáveis de crescimento e desenvolvimento analisadas das plantas da cana-de-açúcar (Tabela 2). É interessante destacar que no sistema hidropônico adaptado foi obtido melhor desenvolvimento das raízes que no sistema hidropônico tradicional, o que é muito importante nesse tipo de pesquisa, pois essa variável é uma das mais importantes para estudar a tolerância das plantas à toxicidade por Al^{3+} (Oliveira, 2012; Ecco et al., 2014; Maia et al., 2018).

Tabela 2 - Médias e diferença mínima significativa (DMS 5%) das características biométricas, obtidas nos sistemas hidropônico e sistema alternativo de hidroponia.

Sistemas	Variáveis									
	AC	ALP	AF	MSR	MSPA	NFV	MFPA	MFR	VR	DC
	----- (cm) -----		- (cm ²) -	----- (g) -----		(N°)	----- (g) -----		- (ml) -	(cm)
HP	22,85a	103,42a	284,37a	4,61b	8,23a	4,30a	35,98a	33,56a	49,65a	1,09a
SA	21,05a	91,30a	236,94a	9,02a	8,48a	4,10a	32,55a	33,27a	47,75a	0,97a
EM	±1,01	±6,56	±25,71	±0,75	±0,88	±0,16	±3,89	±2,24	±2,11	±0,05
DMS	3,01	19,51	76,40	2,22	2,63	0,49	11,57	6,65	6,27	0,16
CV (%)	14,59	21,33	31,19	34,79	33,48	12,54	35,94	21,20	13,72	16,97

Hidropônico (HP), Sistema alternativo (SA), erro da média (EM), diferença mínima significativa (DMS 5%), altura do colmo (AC), altura da planta inteira (APL), Área foliar (AF), massa seca da raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), número de folhas vivas (NFV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), volume radicular (VR) e diâmetro do colmo (DC). Médias iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey à nível de 5% de probabilidade.

A grande vantagem desse sistema alternativo de hidroponia é que permite avaliar um grande número de unidades experimentais de maneira muito mais simples e econômica, pois dispensa o sistema de oxigenação da solução nutritiva reduzindo custos com energia e equipamentos mais sofisticados, permite ainda maior controle de manejo sobre a solução nutritiva e a troca de posição das plantas sem o risco de danificar a raiz das plantas.

Nos resultados de massa seca da parte aérea e da raiz testando doses crescentes de Al^{3+} , a máxima concentração aplicada (70 mg L^{-1}) não foi letal para plantas (Figura 5A). Para a massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas observou-se efeito linear decrescente à medida que aumentou a concentração de Al, com peso médio de 5,19 e 4,38 g para as doses de 60 e 70 mg L^{-1} respectivamente. Para a massa seca do sistema radicular (MSR), também observou-se o mesmo efeito conforme o aumento das doses de alumínio com peso médio de 3,11 e 1,80 g para as doses de 40 e 70 mg L^{-1} respectivamente.

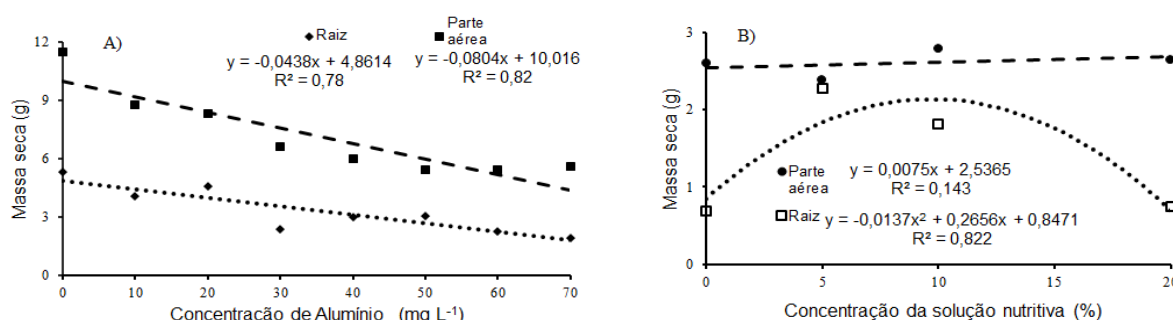


Figura 5 - Valores de massa seca da parte aérea e radicular do genótipo IACSP95-5000 submetido a doses de Al^{3+} (A) e diferentes concentrações da solução nutritiva (B).

Em relação ao ensaio testando a concentração da solução nutritiva observou-se que na concentração de até 20% dos valores originais propostos por Furlani e Furlani (1998), mantendo-se o Al^{3+} e Mn^{2+} fixos, não houve efeito sobre a massa seca da parte aérea. Isso ocorreu provavelmente devido à idade fisiológica da muda, ou seja, nessa fase apenas a reserva ainda disponível no tolete é suficiente para o desenvolvimento da planta. Além disso, sintomas de toxidez do Al^{3+} na parte aérea nem sempre são facilmente identificáveis (Vitti et al., 2002) e, diferentemente do sistema radicular, sofre pouco efeito direto desse elemento, principalmente em tempo relativamente curto (Rosiello e Jacob-Netto, 2006).

A concentração que menos afetou o sistema radicular foi a de 5,15 e 10% da solução nutritiva (Figura 5B). Indicando que a concentração de 5 % é suficiente para provocar o estresse nutricional e ser avaliado junto ao efeito do Al^{3+} e do Mn^{2+} sem provocar a morte das raízes.

Quanto ao experimento principal com os 24 genótipos, pela análise de variância observou-se que houve efeito significativo ($P < 0,05$) para genótipos, tratamento e de interação Genótipo x Tratamento para todas as 14 variáveis biométricas analisadas, exceto para peso fresco e seco do tolete (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise de Variância para Efeitos Principais e Interação para todas as variáveis com os dados originais.

C. de Variação	Parte aérea						
	MSPA	AF	NFV	NFM	ALP	ICV	MFPA
	-----F Calculado-----						
Genótipo (G)	4,45**	2,75**	6,50**	1,76*	3,74**	2,17**	4,69**
Tratamento (T)	417,85**	454,77**	515,71*	145,80**	999,89**	547,09**	722,22**
Interação G x T	4,30**	3,60**	2,92**	1,94*	3,73**	1,70*	3,72**
Erro da Média	±0,34	±56,19	±0,30	±0,24	±3,78	±2,61	±1,49
CV (%)	5,90	38,10	10,75	1,72	10,96	38,40	14,17
C. de Variação	Raiz, Colmo e Tolete						
	VR	MFR	MSR	PFT	PST	DC	AC
	-----F Calculado-----						
Genótipo (G)	4,32**	14,90**	4,90**	8,00**	6,77**	7,58**	3,06**
Tratamento (T)	1273,05**	1156,1**	353,96**	0,04 ^{NS}	7,12**	303,80**	355,33**
Interação G x T	4,40**	13,95**	4,65**	1,62*	1,41 ^{NS}	3,12**	2,55**
Erro da Média	±2,08	±0,29	±0,55	±2,66	±0,54	±0,04	±0,92
CV (%)	25,36	30,13	30,08	18,04	19,13	13,02	13,97

Massa seca da parte aérea (MSPA), área foliar (AF), número de folhas vivas (NFV), número de folhas mortas (NFM), altura da planta (ALP), índice de cor verde (ICV), massa fresca da parte aérea (MFPA), volume radicular (VR), peso fresco da raiz (PFR), massa seca da raiz (MSR), peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), diâmetro do colmo (DC) e altura do colmo (AC). * *significativo a 5 % de probabilidade; **significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo.

Esse resultado mostra a existência da variabilidade genética entre os 24 genótipos. O efeito significativo do tratamento sobre as variáveis também indica que as condições foram adequadas para avaliação do estresse proposto em cana-de-açúcar, utilizando o sistema hidropônico alternativo neste trabalho.

A tolerância ao estresse abiótico é a capacidade de manter estável o crescimento e os valores de outros parâmetros fisiológicos quando submetidos a condições estressantes (Maia et al., 2018). Portanto, não é adequado comparar valores absolutos de variáveis obtidas a partir de genótipos distintos.

Para isolar o efeito particular de cada genótipo e verificar somente o efeito do estresse, os resultados das variáveis foram relativizados. Especificamente, para manter a variabilidade natural encontrada entre todas as unidades experimentais, e manter a variância experimental e premissas estatísticas, considerou-se o valor médio das repetições de cada genótipo sem estresse como sendo 100%, e esse valor foi utilizado para calcular os valores relativos de todos os dados (inclusive o das repetições sem estresse) obtidos em todas as unidades experimentais pertencentes ao mesmo genótipo. A seguir, foi feito uma nova análise de variância (Teste F) confirmando a saída do efeito particular dos genótipos (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise de Variância para Efeitos Principais e Interação para todas as variáveis com os dados relativizados.

C. de Variação	Parte aérea						
	MSPA	AF	NFV	NFM	ALP	ICV	MFPA
	-----F Calculado-----						
Genótipo (G)	3,52 ^{NS}	1,35 ^{NS}	1,43 ^{NS}	1,38 ^{NS}	1,63 ^{NS}	0,27 ^{NS}	1,29 ^{NS}
Tratamento (T)	401,98**	383,25**	457,99**	114,79**	894,75**	933,63**	677,64**
Interação G × T	3,50 ^{NS}	1,31 ^{NS}	1,43 ^{NS}	1,38 ^{NS}	1,64 ^{NS}	0,27 ^{NS}	1,28 ^{NS}
Erro da Média	±2,71	±12,93	±4,75	±13,44	±4,55	±9,05	±5,58
CV (%)	5,87	30,97	11,15	33,93	11,33	30,15	14

C. de Variação	Raiz, Colmo e Tolete						
	VR	MFR	MSR	PFT	PST	DC	AC
	-----F Calculado-----						
Genótipo (G)	0,36 ^{NS}	0,22 ^{NS}	1,11 ^{NS}	1,96 ^{NS}	1,69 ^{NS}	1,98 ^{NS}	1,33 ^{NS}
Tratamento (T)	1230,86**	1046,8**	1352,8**	0,11 ^{NS}	7,29**	280,86**	292,86**
Interação G × T	0,36 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,99 ^{NS}	1,96 ^{NS}	1,69 ^{NS}	1,98 ^{NS}	1,30 ^{NS}
Erro da Média	±7,70	±8,77	±8,13	±8,92	±10,20	±5,60	±6,29
CV (%)	25,26	29,42	27,12	17,76	19,62	12,97	14,88

Massa seca da parte aérea (MSPA), área foliar (AF), número de folhas vivas (NFV), número de folhas mortas (NFM), altura da planta (ALP), índice de cor verde (ICV), massa fresca da parte aérea (MFPA), volume radicular (VR), massa fresca da raiz (MFR), peso seco da raiz (MSR), peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), diâmetro do colmo (DC) e altura do colmo (AC). **significativo a 5 % de probabilidade; *significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo.

A partir da correlação existente entre as variáveis (Tabela 5), foi possível a realização de uma análise exploratória multivariada.

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Person entre as variáveis biométricas de cana-de-açúcar avaliadas sob tratamento com estresse.

	MFPA	MSPA	AF	NFV	NFM	DC	AC	APL	VR	MFR	MSR	PFT	PST
MSPA	0,94333** < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AF	0,82930** < 0,0001	0,80412** < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NFV	0,82265** < 0,0001	0,74113** < 0,0001	0,72979** < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NFM	0,56292** < 0,0001	0,52112* < 0,0001	0,49245** < 0,0001	0,45350** < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DC	0,83641** < 0,0001	0,78693** < 0,0001	0,69332** < 0,0001	0,70224** < 0,0001	0,45385* < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	0,88473** < 0,0001	0,84703** < 0,0001	0,73526** < 0,0001	0,72435** < 0,0001	0,50656** < 0,0001	0,75864** < 0,0001	-	-	-	-	-	-	-
APL	0,94335** < 0,0001	0,87680** < 0,0001	0,81280** < 0,0001	0,78439** < 0,0001	0,54970** < 0,0001	0,74999** < 0,0001	0,85099** < 0,0001	-	-	-	-	-	-
VR	0,94173** < 0,0001	0,84643** < 0,0001	0,82536** < 0,0001	0,84389** < 0,0001	0,60891** < 0,0001	0,78487** < 0,0001	0,82331** < 0,0001	0,92002** < 0,0001	-	-	-	-	-
MFR	0,94895** < 0,0001	0,85448** < 0,0001	0,82606** < 0,0001	0,83604** < 0,0001	0,60979** < 0,0001	0,79399** < 0,0001	0,83499** < 0,0001	0,92202** < 0,0001	0,99219** < 0,0001	-	-	-	-
MSR	0,91867** < 0,0001	0,82820** < 0,0001	0,79613** < 0,0001	0,79712** < 0,0001	0,58347** < 0,0001	0,76938** < 0,0001	0,80153** < 0,0001	0,88303** < 0,0001	0,96813** < 0,0001	0,97941** < 0,0001	-	-	-
PFT	0,10624ns 0,1425	0,165509* 0,0218	0,03349ns 0,6447	-0,0434ns 0,5496	0,09235ns 0,2027	0,21885** 0,0023	0,10968ns 0,1270	0,01676ns 0,8179	0,03944ns 0,5870	0,05100ns 0,4823	0,05483ns 0,4500	-	-
PST	-0,0181ns 0,8029	0,03399ns 0,6397	-0,1050ns 0,1472	-0,16115* 0,0256	-0,0909ns 0,2100	0,1105ns 0,1270	0,05797ns 0,4245	-0,0840ns 0,2465	-0,1160ns 0,9110	-0,1016ns 0,1607	-0,0689ns 0,3422	0,68234** < 0,0001	-
ICV	0,82136** < 0,0001	0,70006** < 0,0001	0,73038** < 0,0001	0,78324** < 0,0001	0,57834** < 0,0001	0,67107** < 0,0001	0,71504** < 0,0001	0,84162** < 0,0001	0,87924** < 0,0001	0,87481** < 0,0001	0,82283** < 0,0001	-0,0465ns 0,5218	-0,1988** 0,0057

Área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca da parte aérea (MFPA), diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (AC), massa seca da raiz (MSR), massa fresca da raiz (MFR), volume radicular (VR), número de folhas vivas (NFV), número de folhas mortas (NFM), índice de cor verde (ICV), peso seco do tolete (PST), peso fresco do tolete (PFT) e altura da planta inteira (APL).

Entre as variáveis analisadas, o peso fresco e seco do tolete junto com o número de folhas mortas foram as que apresentaram os menores coeficientes de correlação. A baixa correlação do número de folhas mortas com as demais variáveis pode ser explicada por uma série de fatores (Tabela 5). Um deles pode estar associado ao fato de a solução nutritiva não ter fornecido os nutrientes em quantidade suficiente para suprir a necessidade de crescimento e desenvolvimento das plantas, consequentemente reduzindo o aparecimento de novas folhas. Entre os nutrientes a falta de nitrogênio é um dos pontos mais importantes, pois, a intensidade da senescência depende da quantidade de nitrogênio disponível, das reservas de nitrogênio na planta e da demanda de nitrogênio dos pontos de crescimento (Wolfe et al., 1988).

A senescência foliar ocorre após redução no surgimento de folhas, responde ao estresse e é dependente do genótipo (Smit e Singels, 2006). A redução no número de folhas verdes tem sido observada em plantas sob estresse abiótico e atribuída como estratégia de redução do gasto metabólico e da superfície transpirante (Inmanbamber et al., 2008).

Outro fator que pode ser mencionado são os próprios sintomas associados à toxidez de Mn^{2+} , caracterizados como necrose das folhas, crescimento retardado, queima das pontas de folhas, encarquilhamento das folhas e diminuição da capacidade fotossintética da planta (Lindon et al., 2004).

Pela Análise dos Componentes Principais (ACP) foram extraídos dois componentes que, juntos, explicaram 57,46% da variação total, discriminando os genótipos em quatro grupos (Figura 6B).

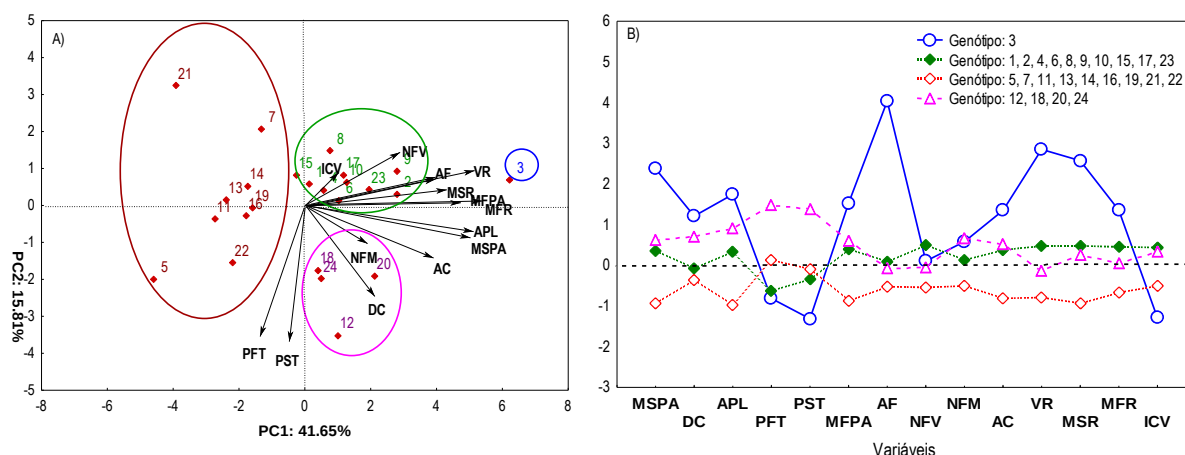


Figura 6 - Biplot da distribuição da nuvem dos genótipos e variáveis pela análise de componentes principais (A), Análise de agrupamento não hierárquica obtida pelo método K-means (B). SP91-1049(1), RB855443(2), RB966928(3), RB965902(4), RB965917(5), CTC 9(6), CTC17(7), CTC 21(8), SP81-3250(9), IAC91-1099(10), IACSP95-5094(11), IACSP96-3060(12), CTC 2(13), CTC 20(14), CTC 24(15), CTC99-1906(16), SP83-2847(17), SP80-3280(18), IACSP95-5000(19), CTC 6(20), CTC 15(21), RB855536(22), RB867515(23), RB935744(24). Massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro do colmo (DC), altura da planta inteira (APL), peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar (AF) e altura do colmo (AC), volume radicular (VR), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR), número de folhas vivas (NFV) e número de folhas mortas (NFM) e índice de cor verde (ICV).

O primeiro componente (CP1) explica cerca de 42% da variação total dos dados e tem o grupo representado na cor verde e azul, fortemente influenciados positivamente pelas variáveis de biomassa da parte aérea e biomassa da raiz (Figura 6A). Vale destacar que os genótipos que estão mais afastados da origem, mais à direita e mais alinhados com o eixo horizontal na Figura 6A, certamente são os mais tolerantes ao estresse imposto. Por sua vez, o grupo vermelho, que apresenta comportamento totalmente contrário dos genótipos do grupo verde e azul, são os mais sensíveis ao ambiente de estresse.

Quanto ao segundo componente (CP2) é responsável por 15,81% da variação e esse componente tem mais relação com as variáveis cujas setas estão mais alinhadas com o eixo vertical do gráfico. Portanto, os genótipos 12, 20, 18 e 24 também sofrem influência das variáveis altura (AC) e diâmetro do colmo (DC) e

número de folhas mortas (NFM). Pela Figura 6A observa-se que as variáveis ICC, número de folhas mortas (NFM) e número de folhas vivas (NFV) apesar de serem indicadores de tolerância (Silva et al., 2011), neste estudo não apresentaram forte influência sobre os grupos discriminados pela CP1. O componente (CP2) também foi responsável por dispersar alguns genótipos do grupo vermelho. Os genótipos 5 e 22 foram influenciados pelas mesmas variáveis responsáveis pela separação do grupo lilás, enquanto os genótipos 7 e 21 tenderam a apresentar resposta oposta ao observado pelos componentes do grupo lilás.

Pelo método de agrupamentos não hierárquico de k-médias ("k-means clustering"), optou-se por definir 4 agrupamentos com base no número de grupos discriminados pela análise de componentes principais. Essa análise permite observar melhor a separação dos grupos quanto à variabilidade genética, bem como suas relações com as variáveis avaliadas (Figura 6B).

Quanto ao padrão de divisão dos genótipos dentro de cada grupo não foi observada relação com os ciclos de maturação, ou seja, precoce médio e tardio (Figura 6B). E certamente a formação dos grupos ocorreu em função da resposta morfofisiológica dos genótipos frente ao estresse imposto. O primeiro agrupamento formado apenas pelo genótipo 3 foi o que mais se destacou, confirmando o resultado da figura 6A, com maiores variações para as características da parte aérea, sistema radicular e índice de cor verde (ICV).

O segundo agrupamento, formado pelos genótipos 1, 2, 4, 6, 8, 9, 10, 15, 17 e 23, foi o que apresentou a menor variação e certamente formado por aqueles genótipos mais tolerantes e medianamente tolerante ao estresse imposto, isso porque, esteve acima da média para quase todas as variáveis biométricas analisadas. O terceiro agrupamento em vermelho é formado pelos genótipos 5, 7, 11, 13, 14, 16, 19, 21 e 22, e esteve muito abaixo da média para as variáveis (Figura 6B) e reforçando o resultado apresentado figura 6A.

O padrão de variação de cada agrupamento está intimamente ligado à média de cada grupo. Portanto, a maior variação observada para o agrupamento do genótipo 3.

Em relação à análise de fatores, primeiramente calculou-se os valores das cargas de fatores provisórios determinados pela análise de componentes principais o que permitiu a obtenção dos componentes cujos autovalores não foram inferiores a 1, seguindo o critério de Kaiser (1958). Na Tabela 6 encontram-se os autovalores e o percentual de variação explicada por cada fator determinado nessa estatística. Aproximadamente 77% da variabilidade dos dados é explicada por quatro fatores principais. Desse modo, os resultados das quatorze variáveis originais foram distribuídos em apenas quatro fatores, cada um deles representando um processo fisiológico independente (Tabela 6).

Tabela 6 - Autovalores e Percentual de Variação Explicada pelos quatros primeiros componentes principais das variáveis biométricas dos 24 genótipos sob o tratamento com estresse.

Fatores	Autovalores	Variância explicada (%)	Autovalores acumulados	Var. Explicada acumulada (%)
1	5,8314	41,65	5,8314	41,65
2	2,2127	15,81	8,0441	57,46
3	1,5545	11,10	9,5986	68,56
4	1,1647	8,31	10,7634	76,88

Para a obtenção e identificação dos quatro fatores (Tabela 6) foi adotado o método de rotação VARIMAX, pois além de proporcionar melhor interpretação dos fatores, esse método tem como objetivo obter uma matriz de cargas mais identificáveis com relação a natureza das variáveis medidas (Maxwel, 1977).

No primeiro fator observa-se que a massa seca da parte aérea, altura da planta, massa fresca da parte aérea, volume radicular, massa seca da raiz e massa fresca da raiz foram as variáveis com as mais altas cargas fatoriais e que explicam 41,65 % da variação total dos dados (Tabela 7). Esse fator refere-se ao processo de toxidez do Al^{3+} , Mn^{2+} e o baixo teor de nutrientes que deve estar ocorrendo sobre os genótipos, pois variáveis MSPA, APL, MFPA, VR, MFR e MSR estão positivamente correlacionadas com esse fator (Tabela 7).

Tabela 7 - Matriz fatorial determinada pelo método de rotação ortogonal Varimax.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
MSPA	0,855719	-0,207812	0,103510	-0,015527
DC	0,363250	-0,571107	0,414618	-0,056875
APL	0,870576	-0,152480	-0,052741	0,117518
PFT	-0,222720	-0,814872	-0,213728	-0,002336
PST	-0,033604	-0,880080	0,053417	0,221009
MFPA	0,832106	0,029983	-0,027889	0,341067
AF	0,690493	0,160176	-0,062728	-0,430157
NFV	0,527029	0,332616	0,313223	0,607166
NFM	0,329085	-0,234881	-0,826445	-0,197130
AC	0,663707	-0,326518	0,110182	0,134335
VR	0,863993	0,207380	-0,012937	-0,215616
MFR	0,927236	0,015774	-0,020385	-0,203106
MSR	0,724444	0,089433	0,027531	-0,150444
ICV	0,178192	0,176984	-0,722021	0,511168
Expl.Var	5,831409	2,212706	1,554565	1,164723
Prp.Totl	0,416529	0,158050	0,111040	0,083194

Massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro do colmo (DC), altura da planta inteira (APL), peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar (AF) e altura do colmo (AC), volume radicular (VR), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR), número de folhas vivas (NFV) e número de folhas mortas (NFM) e índice de cor verde (ICV).

No segundo fator as variáveis com as maiores cargas fatoriais são peso fresco e seco do tolete, que apresentaram correlação inversa com esse fator 2. Esse fator foi responsável por 15,81 % da variação total das 14 variáveis medidas e, por estarem incluídos em fator distinto do primeiro, não deve ter relação com a toxidez do Al^{3+} e Mn^{2+} associado à baixa disponibilidade de nutrientes. É possível que essas variáveis estejam mais relacionadas com o processo de preparação dos minitoletes para a produção das mudas, possivelmente devido à variação do diâmetro dos colmos coletados e à imprecisão do corte dos colmos para obtenção dos minitoletes (Figura 7).



Figura 7 - Minitoletes de colmo de cana-de-açúcar contendo uma gema para produção de mudas.

No terceiro fator, as maiores cargas são referentes ao NFM e ICV com -0,826445 e -0,722021 respectivamente, e que influenciaram 11,10 % da variação total (Tabela 7). E, por último, responsável por cerca de 8 % da variação total, foi detectado o quarto fator, que é formado pelas variáveis NFV e ICV. Da mesma forma que o segundo fator, o terceiro e quarto fatores também parece não apresentar relação com o processo de estresse imposto neste estudo. É possível que estejam relacionados a características específicas dos genótipos, cujas respostas não estejam atreladas ao estresse estudado. Vários são os fatores que podem afetar os valores de ICV incluindo cultivar (Coelho et al., 2010), e o próprio índice de desenvolvimento e/ou crescimento diferenciado podem apresentar valores diferentes do índice ICV (Fontes e Araujo, 2007) e NFV.

Para verificar se existe diferença entre os genótipos dos grupos discriminados pela as análises de k-médias e Componentes Principais, realizou-se a comparação das médias dos genótipos submetidos ao estresse pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5%.

Quanto aos grupos formados pelos genótipos, novamente não se observa uma relação clara com os ciclos de maturação dos genótipos, confirmando os resultados obtidos pelo método de agrupamento não hierárquico k-médias (Figura 5B).

Não foram verificadas diferenças significativas ($P > 0,05$) para variáveis da raiz e índice de cor verde (ICV) entre os genótipos sob o tratamento com estresse, ou seja,

os genótipos foram discriminados em apenas um grupo para essas variáveis (Tabela 8).

Tabela 8 - Comparação de médias dos genótipos no tratamento com estresse, com os dados transformados em porcentagem para variáveis biométricas pelo teste de Scott & Knott a 5%.

GENÓTIPOS	VARIÁVEIS								
	CM	VR	MFR	MSR	PST	PFT	ICV	NFV	NFM
	----- % -----								
SP91-1049(1)	P	17,96A	15,26A	7,89A	95,14B	91,40B	27,98A	68,00B	83,33A
RB855443(2)	P	25,77A	23,65A	20,10A	97,25B	105,70B	13,71A	86,96A	37,50B
RB966928(3)	P	40,54A	33,51A	26,19A	86,80B	83,33B	11,51A	71,43B	71,42A
RB965902(4)	P	28,57A	24,21A	21,43A	93,84B	102,10B	14,85A	64,70B	50,00B
RB965917(5)	P	13,57A	11,78A	10,02A	119,47A	123,30B	6,07A	50,00B	50,00B
CTC 9(6)	P	21,97A	20,70A	19,92A	92,56B	105,28B	22,40A	76,92A	42,85B
CTC17(7)	P	19,31A	15,54A	18,51A	87,51B	86,65B	11,02A	83,33A	22,22B
CTC 21(8)	P	28,41A	20,56A	23,32A	92,73B	98,74B	31,92A	75,00A	62,50B
SP81-3250(9)	M	30,00A	24,87A	30,86A	68,59B	117,01B	18,60A	82,61A	40,00B
IAC911099(10)	M	27,78A	23,42A	21,04A	88,57B	98,34B	26,61A	72,41B	50,00B
IACSP95-5094(11)	M	17,55A	12,08A	10,60A	102,44B	109,85B	18,32A	65,52B	37,50B
IACSP96-3060(12)	M	14,37A	18,69A	9,04A	113,87A	145,53A	19,71A	70,36B	62,50B
CTC 2(13)	M	18,62A	11,71A	6,09A	106,66A	104,27B	19,61A	68,97B	50,00B
CTC 20(14)	M	19,23A	13,32A	9,76A	104,65B	91,01B	27,03A	68,00B	62,50B
CTC 24(15)	M	20,00A	13,58A	12,80A	91,99B	96,37B	19,29A	76,92A	62,50B
CTC99-1906(16)	M	16,50A	12,66A	16,31A	101,72B	112,50B	13,39A	60,00B	25,00B
SP83-2847(17)	T	22,22A	21,60A	17,63A	85,24B	99,89B	25,46A	78,26A	62,50B
SP80-3280(18)	T	19,69A	21,69A	19,97A	146,20A	111,56B	22,66A	70,83B	80,00A
IACSP95-5000(19)	T	18,80A	15,77A	12,60A	111,18A	113,85B	22,85A	71,43B	50,00B
CTC 6(20)	T	26,80A	23,19A	27,11A	123,56A	131,26A	21,76A	66,67B	100,00A
CTC 15(21)	T	12,40A	10,52A	6,87A	72,34B	74,50B	21,68A	64,00B	50,00B
RB855536(22)	T	15,43A	14,82A	18,26A	116,85A	139,08A	11,10A	65,38B	83,33A
RB867515(23)	T	27,92A	25,69A	24,30A	94,57B	102,22B	29,88A	64,00B	116,66A
RB935744(24)	T	23,65A	16,32A	12,57A	127,21A	147,82A	25,36A	72,73B	50,00B

Volume radicular (VR), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR), peso seco do tolete (PST), peso fresco do tolete (PFT), índice de cor verde (ICV), número de folhas vivas (NFV), número de folhas mortas (NFM), Ciclo de maturação (CM), P (Precoce), M (Médio) e T (Tardio). Médias iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott & Knott a nível de 5% de probabilidade.

Genótipos com menor variação de crescimento e/ou desenvolvimento em diferentes ambientes apresentam alta estabilidade e podem ser caracterizados como tolerantes (Maia et al., 2018). Diante disso o genótipo 3 seguido pelos genótipos 2, 12, 9, 23, 8, 4 e 10 foram os que tiveram suas características biométricas menos afetadas pelo o tratamento com estresse proposto e consequentemente foram

considerados os mais tolerantes (Tabela 8). Por outro lado, os genótipos 5, 21, 7, 22, 13, 14 e 16 foram os mais sensíveis ao estresse proposto, principalmente os três primeiros genótipos.

O comportamento apresentado por esses dois grupos de genótipos apresenta bastante coerência com a realidade no campo. Por exemplo, os genótipos do grupo identificado como tolerante são indicados e que realmente estão sendo cultivados em ambientes com solos ácidos, pobres em nutrientes e sujeitos a estiagem (Silva et al., 2012; Ridesa, 2017). Especificamente na região nordeste do país e maior parte do cerrado brasileiro, regiões caracterizadas por solos ácidos e pobres em nutrientes, os genótipos 3, 9 e 23 correspondem a quase 50 % da área plantada (Ridesa, 2015a; Ridesa, 2017). Por sua vez, os genótipos identificados como sensíveis são indicados à ambientes de produção com boas condições edafoclimáticas (Ridesa, 2015a; Ridesa, 2017; CTC, 2018). De fato, os genótipos 13, 21 e 22 não chegam a 3% da área plantada do cerrado brasileiro e, na região nordeste esse percentual é menor que 1% (Ridesa, 2015a; Ridesa, 2017). Portanto, parece que o nível de tolerância apresentado pelos genótipos pode estar relacionado à tolerância ao alumínio.

Entre as variáveis biométricas, o sistema radicular foi o mais afetado pelo estresse causado pelo Al^{3+} sendo que na maioria dos genótipos, o estresse imposto limitou o acúmulo de biomassa das raízes em mais de 70% (Tabela 8, Figura 8). Resultados bem acima do encontrado por Watt (2003), quando avaliou o crescimento de raízes expostas a altas concentrações de Al^{3+} , o autor observou inibição do crescimento radicular com variação entre 36 a 46%.

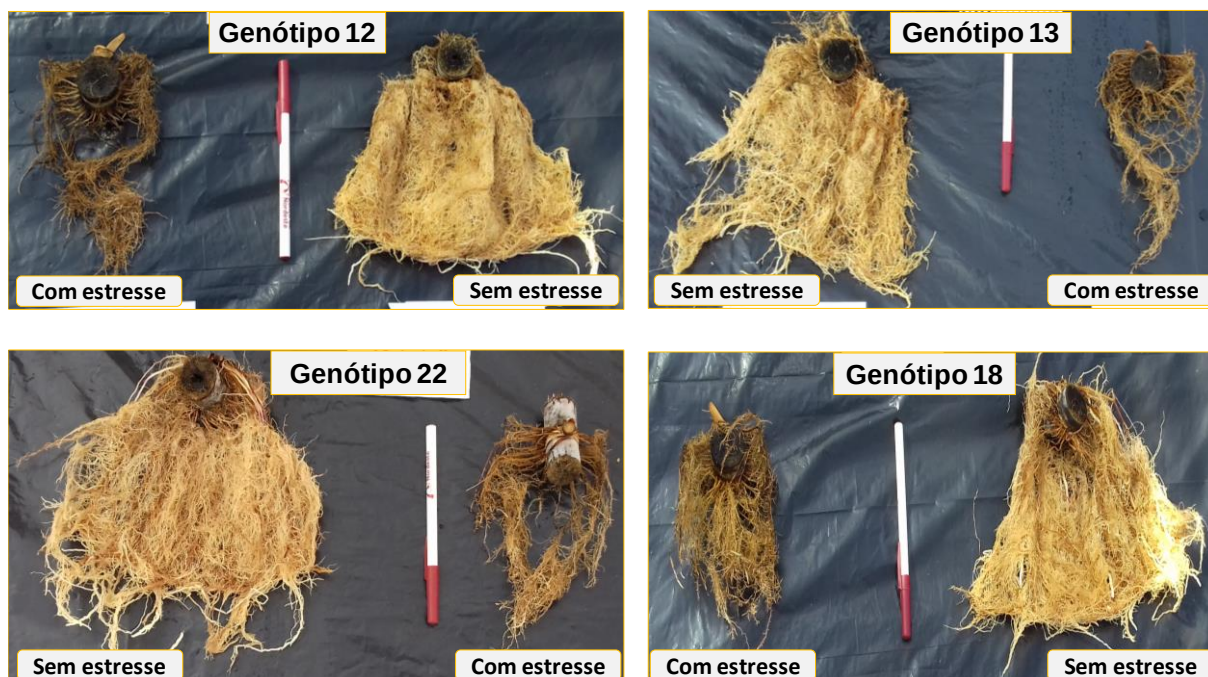


Figura 8 - Sistema radicular de plantas de cana-de-açúcar submetidas aos tratamentos com estresse e sem estresse.

Essa grande limitação da produção de biomassa radicular pode estar associada não só ao efeito do Al^{3+} , mas também ao efeito do Mn^{2+} . Essa afirmativa encontra suporte no fato de que, embora sintomas de toxicidade de manganês nas plantas sejam mais pronunciados nas folhas do que nas raízes, quando a tolerância do trigo à toxicidade de alumínio foi determinada junto com a do manganês em soluções nutritivas foi observado que todos os genótipos mostraram redução no crescimento radicular variando de 59 a 68% à medida que as concentrações de Mn^{2+} nas soluções aumentaram de 0,11 para 1.200 mg L^{-1} (Camargo, 1995). A redução de massa seca da raiz devido ao efeito tóxico do Mn^{2+} , também foi observada em outras culturas como feijão (Soratto et al., 2005) e Arroz (Lindon et al., 2004).

Embora não tenha ocorrido diferença estatística entre os genótipos quanto a redução da massa seca da raiz, aqueles que foram menos afetados tiveram destaque também nas demais variáveis. Esse resultado reforça a importância dessa variável na seleção de genótipos ao estresse causado pelo Al^{3+} .

Quanto à leitura do índice de cor verde (ICV), não foi verificada diferença estatística entre os genótipos sob ambiente de estresse, mesmo essa característica sendo considerada boa ferramenta na seleção de genótipos (Silva et al., 2011). Vale ressaltar que apesar desse resultado, o teor de pigmento nas folhas nesse estudo foi afetado pela condição de estresse quando comparado ao ambiente sem estresse (Figura 9). Indicando que somente a leitura do ICV parece não ser suficiente para seleção de genótipos para essa variável ao nível de estresse que foi provocado, portanto, recomenda-se análises auxiliares em futuras pesquisas com o mesmo foco.



Figura 9-Diferença no teor de pigmentos nas folhas de plantas de cana-de-açúcar submetidas aos tratamentos com estresse (A) e sem estresse (B)

Para as variáveis peso fresco do tolete (PFT), peso seco do tolete (PST), número de folhas vivas (NFV) e número de folhas mortas (NFM) os genótipos foram classificados em dois grupos. Quanto ao PST, apesar de não ter sido verificado relação dessa variável com os genótipos considerados tolerantes, os mais sensíveis apresentam o menor peso seco do tolete. Ecco et al., (2014) avaliando respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio, observaram significativa redução de massa seca do tolete na variedade RB855536 e segundo os autores esta redução sugere maior consumo de energia sob condições de estresse, ao passo que na variedade RB867515 não ocorreu variação

significativa da massa seca do tolete, mesmo sob condições de estresse, o que pode indicar maior tolerância dessa variedade às condições experimentais testadas.

O genótipo 3 foi o que mais se destacou, apresentando os melhores resultados para volume radicular, massa fresca radicular e a segunda maior média para diâmetro do colmo e altura da planta. Além disso, não apresentou redução da área foliar (AF) e massa seca da parte aérea (MSPA) no ambiente de estresse. Resultado semelhante para essa última variável também foi observado com o genótipo 2, compondo o grupo mais tolerante “A” ao estresse imposto (Tabela 9).

Enquanto que o grupo mais sensível “D” é composto pelos genótipos 5, 11, 13, 19, 21 e 22, sendo as menores médias para MSPA apresentadas pelos genótipos 21, 11 e 5 e, conseqüentemente, as maiores restrições de crescimento, que foram de 28,62, 27,11 e 22,88% respectivamente. Os genótipos dos demais grupos apresentaram reduções abaixo dos 20% (Tabela 9). Esses resultados estão abaixo dos encontrados por Ecco et al. (2014) estudando a interação entre tipos de estresse abiótico (déficit hídrico e acidez do solo) em cana-de-açúcar em casa de vegetação onde observaram redução de 23% na produção de biomassa da parte aérea sob o estresse provocado pelo Al^{3+} e 69% sob estresse hídrico combinado com toxicidade do Al^{3+} .

Tabela 9 - Comparação de médias dos genótipos no tratamento com estresse, com os dados transformados em porcentagem para variáveis biométricas da parte aérea pelo teste de Scott & Knott a 5%.

GENÓTIPO	VARIÁVEIS						
	CM	MSPA	DC	AC	MSPA	AF	ALP
		----- % -----					
SP91-1049(1)	P	87,98B	68,75C	72,76A	56,52A	62,68B	60,77B
RB855443(2)	P	100,47A	73,07C	74,72A	72,62A	37,19C	68,53A
RB966928(3)	P	101,35A	86,36B	82,27A	77,66A	112,08A	75,04A
RB965902(4)	P	84,11C	76,00B	78,81A	65,63A	19,04C	57,73B
RB965917(5)	P	77,12D	79,41B	64,18B	46,27B	11,26C	47,31B
CTC 9(6)	P	86,04B	78,57B	62,97B	60,90A	21,18C	62,97A
CTC17(7)	P	79,78C	68,00C	55,60B	52,06B	21,15C	53,37B
CTC 21(8)	P	84,24C	67,74C	56,58B	57,62A	28,38C	61,03B
SP81-3250(9)	M	83,88C	77,77B	77,83A	63,24A	25,45C	72,80A
IAC911099(10)	M	84,86C	83,87B	70,78A	62,21A	22,85C	60,55B
IACSP95-5094(11)	M	72,89D	78,12B	60,90B	45,49B	16,82C	52,96B
IACSP96-3060(12)	M	92,05B	104,54A	83,45A	67,94A	25,18C	68,92A

CTC 2(13)	M	78,05D	72,41C	54,92B	48,66B	15,53C	57,98B
CTC 20(14)	M	81,08C	76,00B	61,71B	51,86B	21,83C	49,97B
CTC 24(15)	M	86,98B	67,85C	65,47B	60,82A	21,33C	63,24A
CTC99-1906(16)	M	82,81C	66,67C	68,67B	53,71B	14,67C	58,52B
SP83-2847(17)	T	82,70C	67,64C	91,6A	57,39A	37,24C	58,76B
SP80-3280(18)	T	87,07B	76,66B	75,43A	63,84A	23,93C	60,95B
IACSP95-5000(19)	T	77,66D	70,27C	61,90B	51,18B	23,52C	54,72B
CTC 6(20)	T	87,44B	77,14B	67,59B	61,90A	36,07C	75,21A
CTC 15(21)	T	71,38D	65,71C	51,22B	39,55B	22,67C	51,44B
RB855536(22)	T	78,27D	43,24D	64,86B	49,82B	13,49C	46,81B
RB867515(23)	T	86,87B	58,33C	73,14A	60,24A	28,95C	68,57A
RB935744(24)	T	88,73B	64,52C	78,95A	64,63A	22,88C	67,75A

Massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro do colmo (DC), altura da planta inteira (APL), massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar (AF) e altura do colmo (AC), Ciclo de maturação (CM), P (Precoce), M (Médio) e T (Tardio). Médias iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott & Knott à nível de 5% de probabilidade.

Maiores limitações na produção de massa seca da parte aérea também foram encontradas por Maia et al. (2018) onde os autores observaram que o estresse causado pelo Al^{3+} proporcionou uma redução média de 44% no peso da parte aérea. Restrições do acúmulo de biomassa da parte aérea devido ao efeito do Al^{3+} , entre outros fatores, ocorrem como resultado da queda na atividade fotossintética. Especificamente, há indicativos que o Al^{3+} limita a formação e a função dos cloroplastos, ao danificar as membranas tilacoides e, conseqüentemente, a cadeia de transporte de elétrons, interferindo na assimilação de CO_2 (Konrad et al., 2005; Mendes et al., 2018).

Os genótipos 9, 23, 8, 4 e 10, mesmo com bons desempenhos, tiveram produção abaixo dos 100% para dados de biomassa da parte aérea. Resultados semelhantes foram obtidos por Maia et al. (2018) avaliando a plasticidade fenotípica de 11 genótipos de Cana-de-Açúcar sob estresse de alumínio, classificando o genótipo 3 (RB966928) como o mais tolerante mesmo apresentando, sob ambas as condições de cultivo, massa seca abaixo da média para parte aérea.

Uma provável explicação para o desempenho desses genótipos pode estar associada à habilidade de excluir o Al^{3+} do ápice da raiz e/ou ao seu acúmulo através de mecanismos como quelação do Al^{3+} no citosol, compartimentalização do Al^{3+} no

vacúolo ou em ligações alumínio-proteínas que são alguns mecanismos de tolerância ao Al^{3+} (Hartwig, 2007; Inostroza-Blancheteau et al., 2012).

Em relação ao comprimento do colmo (AC), os genótipos foram classificados em dois grupos, sendo que os genótipos 17, 12 e 3 foram os menos prejudicados, apresentando limitação de apenas 8,36%, 16,55% e 17,73% respectivamente, enquanto que os genótipos 21, 13, 7 e 8 tiveram mais restrição de crescimento do caule (cerca de 50%) no ambiente de estresse (Tabela 9). Essas variáveis são consideradas excelentes indicadores de tolerância ao estresse proposto, pois são as que mais apresentam correlação com a produção da cana-de-açúcar (Silva et al., 2008).

Em relação a área foliar (AF) e altura da planta (ALP) os genótipos foram classificados em dois e três grupos respectivamente (Tabela 9), para a primeira variável o genótipo 3 foi considerado o mais tolerante seguido pelo genótipo 1 e para variável ALP, os genótipos mais tolerantes foram 20, 3, 9, 12, 23, 2, 24, 15 e 6.

A área foliar é um dos componentes mais importantes da produção e acumulação de biomassa. Dessa forma, maiores áreas foliares proporcionam superfícies significativas para a produção de fotossintatos, mas pode ser prejudicada e interferir no crescimento e na sobrevivência de plantas sob condições de estresse (Taiz e Zeiger, 2013). Portanto, AF assim com ALP são consideradas boas ferramentas na seleção de genótipos a estresse abiótico (Queiroz et al., 2011; Gimenez et al., 2013).

5. CONCLUSÕES

Existe variabilidade quanto à tolerância dos 24 genótipos de cana-de-açúcar à condição de estresse provocada pelo Al^{3+} , Mn^{2+} e baixa disponibilidade de nutrientes.

Não houve relação entre o nível de tolerância dos genótipos com os três ciclos de maturação precoce, médio e tardio.

Foi identificado como mais tolerante o genótipo RB966928 seguido pelos genótipos RB855443, IACSP96-3060, SP81-3250, RB867515, CTC 21, RB965902 e IAC91-1099.

Foram identificados como mais sensíveis os genótipos RB965917, CTC 15, CTC17, RB855536, CTC 2, CTC 20 e CTC99-1906, os demais tiveram comportamento intermediário ao Al^{3+} , Mn^{2+} e baixa disponibilidade de nutrientes.

6. REFERÊNCIAS

- Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) AgroEstat - Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 396 p.
- Barceló J, Poschenrieder C (2002) Fast root growth responses, root exudates and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminum toxicity as resistance. **Environmental and Experimental Botany**, 48: 75-92.
- Benett CGS, Buzetti S, Silva KS, Teixeira Filho MCM, Garcia CMP, Andreotti M (2012) fontes e doses de manganês no acúmulo de nutrientes na palhada em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, 28: 8-16.
- Brito CM (2015) **Variabilidade genética de cana-de-açúcar na tolerância ao alumínio**. 32 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – UFV, Viçosa.
- Buchel C, Barber J, Ananyev G, Eshaghi S, Watt R, Dismuke C (1999) Photoassembly of the manganese cluster and oxygen evolution from monomeric and dimeric CP47-reaction center photosystem II complexes. **Proceedings of the National Academy of Science**, 96: 14288-14293.
- Caldarelli CE, Gilio L (2018) Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, 76:264-505 274.
- Camargo CEO, Felício JC, Freitas JG, Filho AWP (1995) Trigo duro: tolerância à toxicidade de alumínio, manganês e ferro em soluções nutritivas. **Bragantia**, 54: 371-383.
- Cambri MA (2004) **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto**. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ-USP, Piracicaba.
- Carlin SD, Rhein AFL, Santos DM (2012) Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana de açúcar. **Semina Ciências Agrárias**, 33: 553-564.
- Carlin SD, Santos DMM (2009) Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 44:1106-1113.
- Casagrande AA (1991) **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 1991. 157 p.
- Chaves VA (2015) Desenvolvimento Inicial de Duas Variedades de Cana-de-Açúcar Inoculadas com Bactérias Diazotróficas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 39:1595-1602.

Chen LS, Qi YP, Jiang HX, Yang LT, Yang GH (2010) Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. **African Journal of Biotechnology**, 54:9237-9247.

Clarissa SM, Diego KKS, Roberson D, Giovana BA, João CBF (2013) Embriogênese somática da cultivar RB966928 e do clone RB986419 de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Semina: Ciências Agrárias**, 34: 1023-1032.

Coelho FSC, Fonte PCR, Silva MCC, Braun H, Leão AB, Martins AD (2010) Nível crítico dos índices SPAD e de suficiência de N para avaliar o estado nutricional da batateira. **Horticultura Brasileira**, 28:3608-3614.

Costa ASV, Horn AH, Donagemma GK, Polidoro JC, Giacomini RP, Trindade AS (2011) Efeitos no solo do gesso produzido em diferentes reações químicas da solução de ácido sulfúrico reciclada com carbonato de cálcio residual e óxido de cálcio. **Revista de Química Industrial**, 79: 17-21.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira (2018) Boletim Técnico CTC (variedades CTC). Disponível em: <<https://variedadesctc.com.br/informativos-ctc/>> Acesso em: 22 dez. 2017.

Dantas ACM, Forte GRL, Silva JB, Nezi AN, Rodrigues AC (2001) Tolerância ao alumínio em porta-enxertos somaclonais de macieira cultivados em solução nutritiva. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 36:615-623.

Delhaize E, Ryan PR, Randall PJ (1993) Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): II. Aluminumstimulated excretion of malic acid from root apices. **Plant Physiology**, 103: 695-702.

Dodge CS, Hiatt AJ (1992) Relationship of pH to ion uptake imbalance by varieties of wheat (*Triticum vulgare*). **Agronomy Journal**, 64: 476-481.

Doyle CJ, Pablo F, Lim RP, Hyne RV (2003) Assessment of metal toxicity in sediment porewater from Lake Macquarie, Australia. **Environmental Contamination & Toxicology**, 44: 343-350.

Ecco M, Santiago EF, Lima PR (2014) Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. **Comunicata Scientiae**, 5: 59-67.

Fonseca Júnior EM, Cambraia J, Ribeiro C, Oliva MA, Da Matta FM (2014) The effects of aluminium on the photosynthetic apparatus of two rice cultivars. **Experimental agriculture**, 50:343-352.

Fontes PCR, Araújo C (2007) Adubação nitrogenada de hortaliças: princípios e práticas com o tomateiro. Viçosa: UFV, 148 p.

Fox PN, Crossa C, Romagosa I (1997) Multi-environment testing and genotype x environment interaction. In.: Kempton RA (Eds.) **Statistical methods for plant variety evaluation**. Chapman and Hall, London, p. 117–138.

Foy CD (1984) Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicity in acid soil. In: Adams, F. (Ed.), Soil Acidity and Liming, 2 ed. **Agronomy Monograph**, 12: 57-97.

Foy CD, Chaney RL, White MC (1978) The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, 29: 511-566.

Furlani PR, Furlani AM (1988) **Composição de pH de solução nutritiva para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 34 p. (Boletim Técnico, 121).

Geronimo GZ (2014) **Características morfofisiológicas e agrupamento genético de cana-de-açúcar sob deficiência hídrica**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Unesp, Botucatu.

Giannakoula A, Moustakas M, Mylona P, Papadakis I, Yupsanis T (2008) Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. **Journal of Plant Physiology**, 165: 385-396.

Gimenez DFJ, Dedemo GC, Vantini JS, Silva ACB, Tezza RID, Dabbas, KM, Mutton MA, Ferro MIT (2013) Análise dos parâmetros biométricos, acúmulo de prolina e identificação de genes envolvidos na resposta ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, por cDNA-AFLP. **Científica**, 41: 209-225.

Goldfray HCJ, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, Robinsom S, Thomas SM, Toulmin C (2010) Food security: The challenge of feeding 9 billion people. **Science**, 327: 812-818.

Guirra APPM, Fiorentin CF, Prado RM, Caetano MCT, Felici AC (2011) Tolerância do capim marandu a doses de manganês. **Bioscience Journal**, 27: 413-419.

Guo TR, Zhang GP, Zhou MX, Wu FB, Chen JX (2007) Influence of aluminium and cadmium stresses on mineral nutrition and root exudates in two barley cultivars. **Pedosphere**, 17: 505-512.

Hartwig I, Oliveira AC, Carvalho FIF, Bertan I, Silva JAG, Schmidt DAM, Valério IP, Maia LC, Fonseca DAR, Reis CES (2007) Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, 28: 219-228.

Hermann ER, Câmara GMS (1999) Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos**, 17: 32-34.

Hoffmann R (1992) **Componentes principais e análise fatorial**. Piracicaba: Departamento de Economia e Sociologia Rural. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 25 p. (Série Didática n. 76).

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO (2017) Cultivares IAC. Disponível em <<http://www.iac.sp.gov.br/cultivares/inicio/resultados.php>>. Acesso em: 15 Dez. 2017.

Inman-bamber NG, Bonnett G, Spillman MF, Hewitt ML, Jackson J (2008) Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, 59:13-26.

Inostroza-Blancheteau C, Rengel Z, Alberdi M, De la Luz Mora M, Aquea F, Arce-Johnson P, Reyes-Díaz M (2012) Molecular and physiological strategies to increase aluminum. **Molecular Biology Reports**, 39:2069-2079.

Jeffers JNR (1978) **An Introduction to System Analysis: with Ecological Applications**. University Park Press, London, 198 p.

Kaiser HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, 23:187-200.

Kochian LV (1995) Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, 46: 237-260.

Konrad MLF, Silva JAB, Furlani PR, Machado EC (2005) Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, 64:339-347.

Korndörfer GH (2004) Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: Yamada T, Abdalla SRS (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. 16f. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.

Landell MGA (2004) **Behavior of sugarcane (*Saccharum spp*) against aluminum levels in nutrient solution**. Unesp, Jaboticabal, Portuguese.

Libardi, LGP (2017) **Evapotranspiração e coeficiente de cultura de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar para manejo de irrigação em cultivo protegido**. 63 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

Lindon FC, Barreiro MG, Ramalho JC (2004) Manganese accumulation in rice: implications for photosynthetic functioning. **Journal of Plant Physiology**, 161:1235-1244.

Lopes AS (1994) **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. 62 f. (Boletim técnico) - 2ed, São Paulo: ANDA.

Luchiari Júnior A, Resende M, Ritchey KD, Freitas Júnior E, Souza PIM (1986) Manejo do solo e aproveitamento de água. In.: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Brasília: Embrapa Cerrados, p. 285-322.

Ma JF (2007) Syndrome of aluminum toxicity and diversity of aluminum resistance in higher plants. **International Review of Cytology**, 264: 225-252.

Ma JF, Furukawa J (2003) Recent progress in the research of external Al detoxification in higher plants: a minireview. **Journal of Inorganic Biochemistry**, 97: 46-51.

Ma JF, Nagao K, Sato K, Ito H, Furukawa J, Takeda K (2004) Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. **Journal of Experimental Botany**, 55: 1335-1341.

Ma JF, Ryan PR, Delhaize E (2001) Aluminum tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in plant Science**, 6: 373-278.

Magalhães CMC, Garcia RR, Francelino FMA, Francelino HO, Coelho FC (2015) Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices** v.17: 163-181.

Magalhaes JV (2002) **Molecular genetic and physiological investigation of aluminum tolerance in Sorghum (Sorghum bicolor L. Moench)**. 384f. PhD (Thesis) - Cornell University, New York.

Maia C, Almeida CF, Costa PMA, Melo Júnior JAG, Silveira G, Peternelli LA, Barbosa MHP, Bhering LL (2018) Phenotypic Plasticity of Sugarcane Genotypes under Aluminum Stress. **Journal of Experimental Agriculture International**, 22:1-11.

Manzini FF, Sá KB, Plicas LMA (2010) **Metais pesados: fonte e ação toxicológica**. In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA. Tupã: p. 800-81.

Marschner H (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. 2ed. London: Academic, 889 p.

Maxwell AE (1977) Multivariate analysis in behavioral research. London, Chapman and Hall, 164 p.

Mendes TP, Oliveira FL, Tomaz MA, Rodrigues WN, Teixeira AG (2018) Aluminum toxicity effect on the initial growth of yacon plantlets. **Revista Ceres**, 65:120-126.

Meneguetti CC, Mezaroba S, Groff AM (2010) Fatores relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar. IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. **Resumos...** Campo Mourão, Paraná: 1-7 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA (2012) **Anuário Estatístico da Agroenergia**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/anuario_agroenergia_web_2012.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2017.

Oliveira MS (2012) **Tolerância da variedade de cana de açúcar (*Saccharum SSP.*) á toxidez por alumínio em solução**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - São Carlos: UFSCar.

Peixoto PHO, Pimenta DL, Cambraia J (2007) Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, 66: 17-25.

Piñeros MA, Magalhaes JV, Alves VMC, Kochian LV (2002) The physiology and biophysics of na aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. **Plant Physiology**, 129: 1194-1206.

Ponnamperuma FN, Lantin RS (1985) **Diagnoses and amelioration of nutritional disorders of rice**. Los Baños: IRRI, 20p.

Prado RM (2008) Nutrição de plantas. São Paulo: Editora UNESP, p.245-258.

Queiroz RJB, Santos DMM, Fraudo AS, Carlin SD, Silva MA (2011) Biochemical and physiological responses of sugarcane variedades to soil water deficiencies. **Scientia Agricola**, 68: 469-476.

Raij BV (2011) **Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície**. Informações agronômicas Nº 135. 10 p.

RIDESa - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucoenergético (2017). **Censo varietal Brasil - 2016/17: Estados de AL, GO, MA, MG, MS, MT, PB, PE, PI, PR, RN e SP**. Disponível em: < <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal> >. Acesso em: 08 mar, 2018.

RIDESa- Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooeiro (2010). **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba (PR), 136p. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/097ffc_e328a69f7b78434088b21262cab3c75f.pdf>. Acesso em: 08 Agost. 2018.

RIDESa- Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooeiro (2015a). **Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. Curitiba (PR), 72p. Disponível e: <https://docs.wixstatic.com/ugd/097ffc_630ca4e433634264a1315ef02f4fb1d5.pdf>. Acesso em: 08 Agost. 2018.

RIDESA- Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (2015b). **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. Curitiba (PR), 156P. Disponível em :<https://docs.wixstatic.com/ugd/097ffc_96da199c42e04e64baa981fff181f245.pdf>. Acesso em: 23 jun, 2018.

Rodrigues M (2013) **Sistema de manejo e a dinâmica das formas do fósforo e da fertilidade em solos de cerrado**. 113p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Esalq, Piracicaba.

Rossiello ROP, Jacob Netto J (2006) Toxidez de alumínio em plantas; novos enfoques para velho problema. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 375-418.

Seal HL (1964) *Multivariate Statistical Analysis for Biologists*. Mathuen, London, 209 p.

Serafim LGF, Stolf R, Silva JR, Silva LCF. Maniero MA (2012) Influência do plantio mecanizado no índice de brotação da cana-de-açúcar. In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 10., 2012, Londrina. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CLIA/CONBEA, Londrina. **Anais...** Londrina, [S.n.] p. 1- 4. CD-ROM.

Silva GC, Oliveira FJ, Anunciação Filho CJ, Simões Neto DE, Melo LJOT (2011) Divergência genética entre genótipos de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 6:52-58.

Silva IR, Smyth TJ, Raper CD, Carter TE, Rufty TW (2001) Differential aluminum tolerance in soybean: An evaluation of the role of organic acids. **Physiologia Plantarum** 112: 200-210.

Silva JOL (2015) Avaliação de cultivares de cana-de-açúcar quanto à tolerância à toxidez por alumínio. Xv congresso nacional de iniciação científica (CONIC/SEMESP). **Resumos...** Ribeirão Preto.

Silva LM (2007) **Crescimento radicular e absorção de nutrientes de cultivares de arroz submetidos ao alumínio em solução nutritiva**. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia), FCAV -Unesp, Botucatu.

Silva M A, Carlin SD, Perecin D (2004) Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, 51: 457-466.

Silva MA, Silva JAG, Enciso J, Sharma V, Jifon J (2008) Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, 65:620-627.

Silva S, Carnide OP, Lopes PM, Matos M, Pinto HG, Santos C (2010) Differential aluminium changes on nutrient accumulation and root differentiation in a sensitive vs. tolerant wheat. **Environmental and Experimental Botany**, 68: 91-98.

Smit MA, Singels A (2006) The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, 98: 91-97.

Sneath PHA & Sokal RR (1973) Numerical taxonomy. San Francisco: Freeman, 573 p.

Soratto RP, Silva TRB, Borghi E, Silva LM, Rosolem CA (2005) Resposta de quatro cultivares de feijão ao manganês em solução nutritiva. **Revista brasileira Agrociência**, 11:25-24.

Sousa DM, Miranda LN, Oliveira SA (2007) Acidez do solo e sua correção. IN; Novais FR, Alvarez VH, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL., ed. **Fertilidade do solo**. Viçosa: sociedade brasileira de ciência do solo. p. 205-274.

STATSOFT. Inc. **Data analysis software system**. Version 7. www.statsoft.com, 2004.

Taiz L, Zeiger E (2013) Fisiologia vegetal. Porto alegre: Artmed, 918p.

Taylor GJ (1991) Current views of the aluminum stress response: the physiological basis of tolerance. In: Randall DD, Blevins DG, Miles CD (eds.). **Current Topics in Plant Biochemistry Physiology** 10: 57-93.

Too EJ, Were BA, Onkware AO, Ringo JH, Kisinyo P, Carlsson AS, Ouma E, Geleta M, Gudu S (2014) Response of selected Sorghum (*Sorghum bicolor*. L Moencher) germplasm to aluminium stress. **African Journal of Agricultural Research**, 9:1651-1662.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Única data. São Paulo: 2017. Disponível em:< <http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em: 08 janeiro, 2018.

Vitti GC, Mazza JÁ (2002) Planejamento, estratégia de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Encarte Informações Agrônomicas**, 97: 1-16.

Watt DA (2003) Aluminum-responsive genes in sugarcane: identification and analysis of expression under oxidative stress. **Journal of Experimental botany**, 54:1163-1174.

Wolfe DW, Henderson DW, Hsiao TC, Alvino A (1988) Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. **Agronomy Journal**, 80: 859-864.

Wolfe DW, Henderson DW, Hsiao TC, Alvino A (1988) Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. **Agronomy Journal**, 80: 859-864.

Zhang J He Z, Tian H, Zhu G, Peng X (2007) Identification of aluminium-responsive genes cultivars with different aluminum sensitivities. **Journal of Experimental Botany** 58: 2269-22787.