



**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Agrárias**  
**Engenharia Agrônoma**



**MIRELLA CRISTINA SBRISSA**

**TOLERÂNCIA DE PORTA ENXERTOS  
CÍTRICOS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

**ARARAS – 2013**

Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Agrárias  
Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental

**MIRELLA CRISTINA SBRISSA**

**Tolerância de porta enxertos  
cítricos ao alumínio em solução**

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Agrônômica – CCA – UFSCar  
para a obtenção do título de Engenheiro  
Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Casagrande  
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

**Araras-SP  
2013**

*DEDICATÓRIA*

**Dedico este trabalho à minha família,  
às minhas amigas irmãs da República  
Gaia, ao meu namorado Pipo e aos  
meus amigos Neto, Antéia, Fernanda  
e Thaís.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o Professor Doutor Marcio Roberto Soares, que sem seu auxílio não seria possível conduzir este trabalho, ao Franz Hipler pela sua ajuda e cooperação, a minha grande amiga Jacqueline Malvestiti que colaborou para realização deste trabalho.

**“Nem todos que sonharam conseguiram, mas para conseguir é preciso sonhar”.**

**Gabriel, o Pensador.**

## RESUMO

Uma das principais causas de prejuízos na produtividade agrícola se deve às altas concentrações de alumínio (Al) na solução do solo, característica de solos ácidos intemperizados da zona tropical úmida. O Al afeta a morfologia e a fisiologia do sistema radicular, limitando o aprofundamento das raízes no solo e a absorção de água e de nutrientes. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes concentrações de Al (0; 7,5 mg L<sup>-1</sup>; 15 mg L<sup>-1</sup>; 22,5 mg L<sup>-1</sup> e 30 mg L<sup>-1</sup>) no desenvolvimento radicular das variedades de porta enxerto cítricos Tangerina Sunki (*Citrus sunki* Hort. ex Tan.), Citrumelo Swingle (*Citrus paradisi* Macf. X *Poncirus trifoliata* Raf.) e Limoeiro Cravo (*Citrus limonia* Osbeck), por meio da avaliação de alterações morfológicas nas raízes das mudas visíveis por microscopia óptica, do acúmulo de biomassa seca e da taxa de alongamento radicular. O experimento foi conduzido em condições de laboratório, em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Os resultados de taxa de crescimento radicular (mm dia<sup>-1</sup>) foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. O aumento da concentração de Al em solução causou diminuição da taxa de alongamento radicular (mm dia<sup>-1</sup>) dos três porta enxertos. As mudas de Limoeiro Cravo foram menos sensíveis à presença do Al quanto ao parâmetro acúmulo de biomassa. A presença do Al não afetou o acúmulo de biomassa no caule das mudas de Citrumelo Swingle, mas reduziram o acúmulo de biomassa radicular das mudas de Tangerina Sunki. O período de 30 dias de exposição das raízes ao Al não foi suficiente para promover alterações morfológicas visíveis. A concentração crítica de Al em solução, a partir da qual houve decréscimo no acúmulo de biomassa e na taxa de alongamento radicular, foi de 15 mg L<sup>-1</sup> de Al. A biometria de raízes indicou a seguinte sequência dos porta enxertos quanto à tolerância ao Al em solução: Citrumelo Swingle=Limoeiro Cravo>Tangerina Sunki.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1** - Distribuição e profundidade do sistema radicular de porta enxertos cítricos.

**Figura 2** - Disponibilidade de nutrientes vegetais em relação ao pH do solo.

**Figura 3** - Aspectos morfológicos de raízes de plântulas de trigo afetadas pelo Al do solo.

**Figura 4** - Ensaio preliminar com mudas cítricas acomodadas em pranchas de isopor para exposição do sistema radicular à solução nutritiva.

**Figura 5** - Mudas cítricas em período de aclimatação, com sistema radicular imerso em solução nutritiva, sistema de oxigenação e iluminação artificial.

**Figura 6** - Mudas cítricas fixadas em placas de EVA, para exposição do sistema radicular ao Al em solução; conjunto submetido a aeração e a iluminação artificial.

**Figura 7** – Separação de folhas, caule e raiz para análise de massa seca.

**Figura 8** – Microscopia óptica do sistema radicular de Citromelo Swingle.

**Figura 9** – Microscopia óptica do sistema radicular de Limoeiro Cravo.

**Figura 10** – Microscopia óptica do sistema radicular de Tangerina Sunki.

**Figura 11** – Mudança nos valores de massa seca das folhas das variedades analisadas em função dos tratamentos.

**Figura 12** – Mudança nos valores de massa seca dos caules das variedades analisadas em função dos tratamentos.

**Figura 13** - Mudança nos valores de massa seca das raízes das variedades analisadas em função dos tratamentos.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1-** Teores foliares de macro e de micronutrientes considerados adequados para a cultura do citros.

**Tabela 2** - Fontes e concentrações de micronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de mudas cítricas.

**Tabela 3** - Fontes e concentrações de macronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de mudas cítricas.

**Tabela 4** - Resumo da análise de variância (ANOVA) de taxa de alongamento radicular de porta-enxertos de citros submetidas à concentrações crescentes de Al em solução.

**Tabela 5-** Médias de taxa de alongamento radicular de porta-enxertos de citros submetidas à concentrações crescentes de Al em solução.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO
.....	10
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 Milho classificação taxonômica .....	12
2.2 Milho no Brasil e no Mundo .....	12
2.3 Fatores que interferem na produtividade do milho.....	13
2.4 Efeitos do Al no sistema radicular.....	15
2.5 - Mecanismos bioquímicos de tolerância ao Al.....	20
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>26</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODO</b> .....	<b>27</b>
4.1 Pré-germinação das sementes .....	27
4.2 Natureza da solução nutritiva e tempo de cultivo.....	27
4.2.1 Composição da solução nutritiva .....	28
4.3 Faixa de concentração de Al em solução nutritiva .....	30
4.4 Tempo de exposição das raízes à solução contendo Al.....	31
4.5 Parâmetros estudados .....	31
4.5.1 Teste de coloração das raízes com indicadores.....	31
4.5.2. Estimativas das taxas de alongamento radicular.....	33
4.6 – Avaliação dos resultados .....	34
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
5.1 Teste de coloração das raízes com corantes indicadores .....	35
5.1.1 Avaliação do ápice radicular submetido a hematoxilina na <b>AG8061</b> .....	35
5.1.2: Avaliação do ápice radicular submetido a hematoxilina na <b>Dow 2B655</b> .....	35
5.1.3: Avaliação do ápice radicular submetido a hematoxilina na <b>DKB 747</b> .....	35
5.1.4: Avaliação do ápice radicular submetido a hematoxilina na <b>Al.Band.</b> .....	36
5.2 Testes de coloração das raízes com corantes indicadores.....	36

5.2.1 Método da Hematoxilina .....	36
<b>5.3 Avaliação dos Ápices radiculares em microscópio .....</b>	<b>37</b>
5.3.1 Avaliação dos ápices radiculares da variedade AG 8061 .....	37
5.3.2 Avaliação dos ápices radiculares da variedade DOW 2B655 .....	38
5.3.3 Avaliação dos ápices radiculares da variedade DKB 747 .....	38
5.3.4 Avaliação dos ápices radiculares da variedade AI Bandeirante .....	38
<b>5.4 Análise Estatística .....</b>	<b>41</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>43</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

As plantas cítricas são originárias das regiões tropicais e subtropicais da Ásia e do Arquipélago Malaio, que se estende desde a Índia, Norte da China, e Nova Guiné até a Austrália (SIMÃO, 1971).

A citricultura foi implantada no Brasil a partir do início do século XX, passando a ocupar espaço no cenário agrícola nacional ao lado de grandes culturas, como a da cana-de-açúcar e do café, por volta da década de 1960. Com mais de um milhão de hectares de plantas cítricas em seu território, o Brasil tornou-se, na década de 1980, o maior produtor mundial (ABECITRUS, 2004), sendo que o setor citrícola, em 2000, participou com 2% do total das exportações brasileiras e com 6% entre os produtos do agronegócio (SOARES, 2003). Em 2002, o país chegou a produzir 20,251 milhões de toneladas, correspondente a 19,38 % da produção do mundo (FAO, 2003). No comércio internacional de suco concentrado de laranja, principal produto da citricultura, o país já respondeu por cerca de 80% (Estanislau et al., 2001).

Atualmente, no Brasil, a produção de citros é de mais de 21,327 milhões de toneladas, o que representa 27% do setor em relação a produção mundial. Isso significa que a cada cinco copos de suco de laranja consumidos no mundo, três são produzidos no Brasil (ESALQ, 2012).

O crescimento da citricultura no Brasil está relacionado à expansão dos pomares e ao desenvolvimento do setor industrial, representando um dos setores mais competitivos do agronegócio.

A ampliação da área plantada com citros ocorreu por muito tempo sobre solos ácidos, de baixa fertilidade e com elevados teores de Al (NOGUEIRA et al., 1989). O Al é um elemento notadamente conhecido como fator responsável por distúrbios nutricionais em plantas cultivadas em solos ácidos (NOGUEIRA et al., 1977). Além disso, também possui efeito tóxico quando em quantidade elevada na solução do solo, limitando o crescimento de muitas espécies de plantas (Foy et al., 1978).

A fitotoxidez do Al manifesta-se, principalmente, pela inibição do crescimento das raízes dos vegetais, o que traz consequências negativas sobre

a nutrição mineral e sobre a absorção de água (FOY & FLEMING, 1978). A variabilidade na adaptação ao Al pode ser observada entre as plantas do mesmo gênero, ou entre variedades da mesma espécie (NUNES et al., 1995, SIMON et al., 1994, MASSOT et al., 1999). A utilização de genótipos tolerantes ou resistentes à toxicidade por Al torna-se uma opção importante para a ocupação de solos ácidos.

A necessidade de superar novas dificuldades e alcançar objetivos pertinentes à modernização da citricultura mundial tem ampliado a importância do uso dos porta-enxertos, recurso com emprego bem sucedido pela horticultura. Capazes de influenciar várias características hortícolas e fitopatológicas nas árvores e nos frutos cítricos, os porta-enxertos podem refletir na aptidão do pomar em relação ao destino da produção (SEMPIONATO et al., 1997).

O caráter perene da cultura de citros implica na escolha da muda, que é plantada e cuidada por 6 a 8 anos antes de revelar seu máximo potencial na produtividade e na qualidade do fruto. Outros aspectos, como a longevidade do pomar, só serão reconhecidos em um intervalo ainda maior após o plantio. As características mais importantes da muda cítrica são a origem do enxerto e do porta-enxerto (plantas matrizes) e a qualidade do sistema radicular (LIMA, 1986). O emprego do porta enxerto influencia em vários fatores, o que inclui a compatibilidade, o porte, a adaptabilidade ao solo, a resistência à doenças, e a qualidade do fruto (SIMÃO, 1971).

No caso dos citros, tem-se observado que o porta-enxerto determina importantes características ao conjunto copa/porta-enxerto, como tolerância a períodos de estresse hídrico, acidez elevada do solo e alta saturação por Al (PACE & ARAÚJO, 1986).

O limoeiro Cravo (*Citrus limonia* Osbeck.) representa cerca de 80% dos porta enxertos utilizados no Brasil (SCHÄFER & DORNELLES, 2000), devido a importantes características como a maior tolerância ao estresse hídrico, a alta produtividade e a indução ao vigor. Esta condição torna o limoeiro cravo extremamente vulnerável sob o ponto de vista genético. A incidência do declínio em pomares é responsável pela perda de quase dez milhões de plantas por ano (POMPEU JÚNIOR, 1991).

Variedades promissoras sob determinadas condições edafoclimáticas têm sido indicadas pela pesquisa, visando promover a diversificação de porta-

enxertos nos pomares comerciais. Entre os porta-enxertos alternativos, tem-se destacado a tangerina 'Sunki' (*C. sunki* Hort. ex Tan.) e o citrumelo Swingle (*Citrus paradisi X Poncirus trifoliata*). Há a necessidade de diversificar os porta-enxertos utilizados na citricultura brasileira, diminuindo o risco de um surto eventual de doenças ou pragas, e permitindo a exploração econômica de áreas que apresentam as mais diversas condições edafoclimáticas.

Entretanto, esta diversificação não tem ocorrido com a amplitude necessária, sendo o limoeiro Cravo ainda o mais utilizado (Pompeu Júnior, 1991). Outro fator a ser considerado, é que existem poucas informações sobre a assimilação de nutrientes por diferentes porta enxertos relacionada à tolerância de alumínio em regiões tropicais, principalmente no Brasil onde a citricultura é de grande importância econômica (Vasconcellos, 1987).

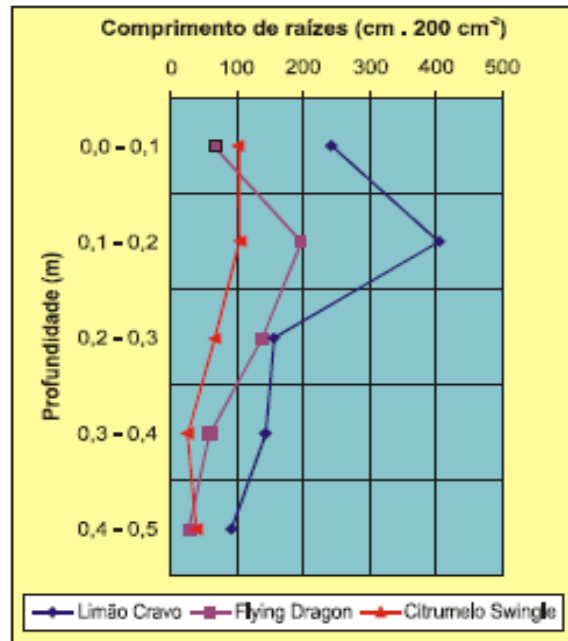
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMA RADICULAR E SUA RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS DO SOLO

O solo estabelece com as plantas diversas relações, principalmente com seu sistema radicular. Primeiramente, oferece à planta suporte físico, para que o vegetal, por meio de suas raízes, tenha fixação. Além disso, o solo também proporciona uma proteção ao frio e à seca, servindo como reservatório de água, nutrientes e sais minerais (MOREAU et. al., 1971).

Por sua vez, as raízes desempenham importantes funções durante o ciclo biótico do vegetal, como por exemplo a absorção de água e de nutrientes, a respiração, a produção de aminoácidos, proteínas, hormônios e outras substâncias orgânicas, a excreção de açúcares, ácidos orgânicos e componentes minerais, etc.. Contribui para a agregação das partículas do solo e para a abertura de canais ao longo do perfil do solo, beneficiando sua estrutura (REZENDE et al., 2002). Algumas espécies possuem a raiz principal profunda e bem desenvolvida, com algumas ramificações. Em outras espécies, a raiz é curta e/ou atrofiada e possui muitas ramificações.

Apesar da relação solo-planta estar bem estabelecida, o conhecimento dos fatores edáficos é importante para julgar o potencial de produção agrícola. Quanto menor o volume de solo explorado pelo sistema radicular, menor será a produtividade da cultura de interesse. Existem muitas diferenças entre os sistemas radiculares de diferentes variedades de citros, em sua forma, quantidade profundidade e resistência à barreiras físicas e químicas do solo (KEMPER, 1981). Em solos bem drenados, tem sido observado que o crescimento das raízes de citros pode atingir de 120 a 150 cm de profundidade, com maior concentração entre 60 e 90 cm (MOREIRA, 1983). Abrêu (2005) observou que a distribuição do sistema radicular dos porta enxertos Swingle, Flying Dragon e Cravo foi diferente em solo do tipo Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 1999), com 8,1% de argila (Figura 1).



**FIGURA 1.** Distribuição e profundidade do sistema radicular de porta enxertos cítricos.

Fonte: ABRÊU (2005).

Considera-se que um solo agrícola favorável ao desenvolvimento das raízes seja resultante da interação entre seus atributos físicos, químicos e (micro)biológicos (ARATANI et al., 2009).

A constituição granulométrica do solo, ou seja, a proporção de argila, silte e areia, a mineralogia e a organização destas partículas na formação da estrutura, dependem dos fatores pedogenéticos e tem implicações sobre seus atributos físico-químicos (MUGGLER, 2005) Qualquer alteração significativa que ocorra na estrutura do solo, seja pela compactação, seja por outro processo, influenciará na resposta do solo em termos de comportamento físico ao crescimento das plantas (PEDROTTI & DIAS Jr., 1996).

Segundo Pedrotti et al. (2001), a resistência à penetração descreve um obstáculo físico que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele. Essa resistência geralmente aumenta com a compactação e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas, prejudicando o desenvolvimento das raízes. Os atributos físicos que seriam mais relevantes no impedimento do desenvolvimento radicular são: densidade do solo, porosidade e estrutura, resistência mecânica, aeração e a

resistência à penetração (compactação) (KARLEN et al., 1994; TORMENA et al., 1996; QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998).

No caso dos atributos químicos, a acidez do solo é um dos fatores mais críticos ao desenvolvimento do sistema radicular e da planta em si. O solo ácido apresenta características prejudiciais ao crescimento, desenvolvimento e metabolismo vegetal, como por exemplo os altos teores de  $H^+$  e  $Al^{3+}$  ativos na solução do solo, a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e a disponibilidade restrita de nutrientes (MUGGLER, 2005). De todos os fatores ligados à barreira química, a toxidez por Al é o maior limitante ao aprofundamento radicular, principalmente em solos com pH abaixo de 5,0. O nível de toxidez varia de acordo com a quantidade de Al na solução do solo e com sua interação com outros elementos químicos, sobretudo Ca, P, K e Mg (CANAL & MIELNICZUK, 1983).

## 2.2 TOXIDEZ POR ALUMÍNIO

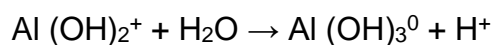
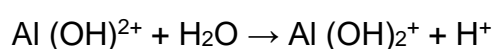
A constituição química da crosta superior da Terra apresenta predomínio de oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al). A cada 100 átomos da crosta terrestre, cerca de 6 ou 7 são de Al, 60 são de O e 20 são de Si. Estes elementos formam os minerais secundários do solo, representados principalmente por óxidos e silicatos de Al. O restante são átomos de ferro (Fe), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e magnésio Mg). Estes 8 elementos constituem 99% do total de átomos presentes na superfície terrestre (CREPANI et al., 2001).

Segundo VIOLANTE & VIOLANTE (1980), o íon Al vem da decomposição de silicatos de  $Al^{3+}$ , feldspatos, micas, anfibólios, piroxênios e minerais secundários. Há liberação de Al quando os minerais são intemperizados. O elemento pode combinar-se com o Si para formar minerais secundários, ser complexado pelos compostos orgânicos ou ser precipitado sob a forma de hidróxidos de Al.

A liberação do íon  $Al^{3+}$ , depende de diversos fatores, entre eles a influência de alguns elementos químicos. Em solos de locais com elevadas precipitações pluviométricas, ocorre a lixiviação de nutrientes solúveis, como Ca, Mg e K. Quando a remoção dos cátions básicos é maior do que a liberação através da intemperização das rochas, o pH do solo diminui. Outro fator que



também pode influenciar a liberação do Al trocável é a mineralização da matéria orgânica por micro-organismos, que resulta na liberação de nitrato e hidrogênio, contribuindo também para que o pH do solo diminua (BOHNEN, 1995). Em pH baixo (<5,5), o hidrogênio (H<sup>+</sup>) atua sobre os minerais liberando os íons Al<sup>3+</sup>, que ficam predominantemente retidos pelas cargas negativas das partículas de argila do solo, em equilíbrio com o Al<sup>3+</sup> em solução. Assim, a quantidade de Al<sup>3+</sup> em solução aumenta com a acidez do solo (BOHNEN, 1995). Em solução, estes íons Al<sup>3+</sup> atraem moléculas de água e, por processos de hidrólise, há liberação de íons H<sup>+</sup>, fazendo com que o pH do solo diminua ainda mais, conforme a reação:



A reação completa de hidrólise, até a formação do hidróxido de Al precipitado, contribui para a liberação de três íons H<sup>+</sup>. À medida que o pH do solo diminui, aumenta a atividade do Al na solução do solo e, conseqüentemente, ocorre potencialização dos efeitos nocivos desse elemento às culturas (SALET et al., 1999).

## 2.3 EFEITOS DO ALUMÍNIO SOBRE O SISTEMA RADICULAR

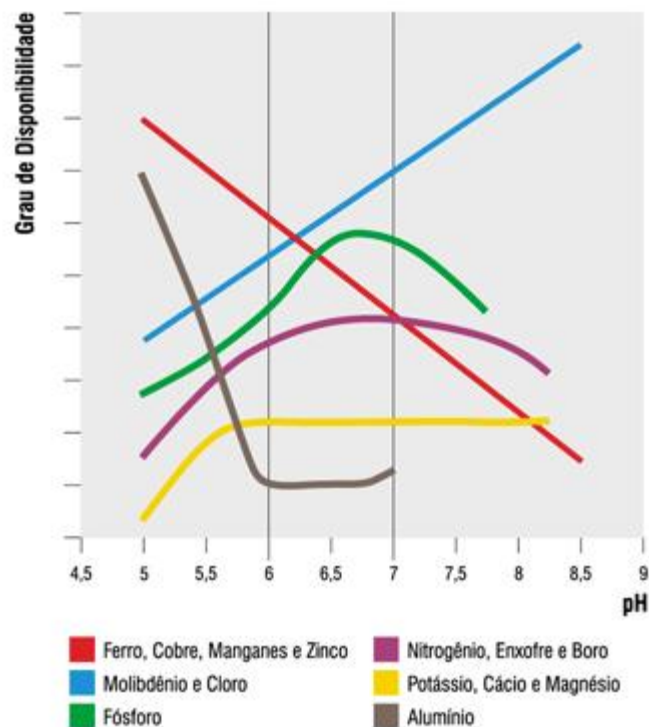
A toxidez causada pelo Al provoca diversos efeitos sobre a planta, que incidem principalmente sobre o sistema radicular. Os danos radiculares mais importantes atribuídos ao Al na solução do solo são:

a. *Alterações na membrana da célula:* as membranas das células radiculares são as primeiras a sentir os efeitos tóxicos do Al. As alterações causadas pelo Al diminuem a permeabilidade da célula para água, devido a alteração das propriedades da membrana plasmática e vacuolar (ZHAO et al., 1987);

b. *Inibição da síntese de DNA e da divisão celular:* um dos danos de maior importância para o sistema radicular é a inibição da divisão celular. Ela ocorre porque polímeros de Al capturam as seções da dupla hélice de DNA, através da forte ligação entre fosfato com a carga negativa e a carga positiva do polímero (WALLACE & ANDERSON, 1984);

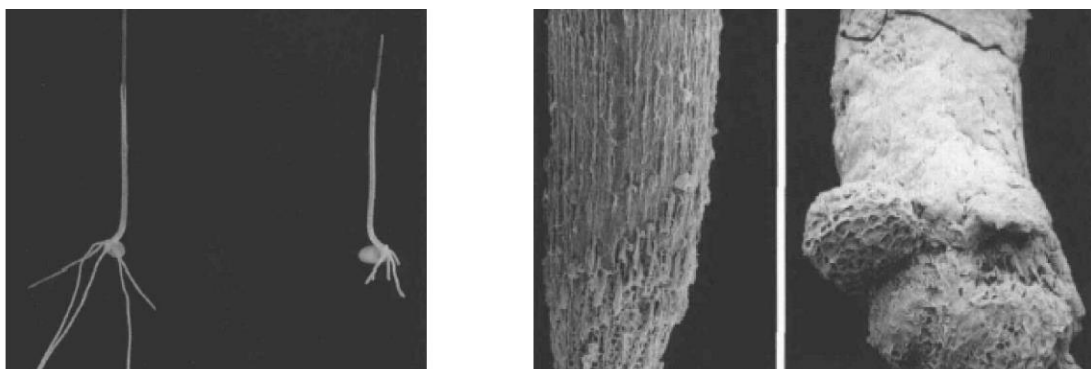
c. *Inibição do alongamento celular:* a inibição do alongamento celular ocorre devido a alterações na região da coifa, que agem como sensores ao estresse

ambiental (MARSCHNER, 1991). Acredita-se que estas alterações ocorram devido a altas concentrações de Al no núcleo das células (NAIDOO et al. 1978); d. *Alterações na absorção de nutrientes*: devido a inibição do crescimento do sistema radicular pelo Al, a área explorada torna-se potencialmente pequena, resultando em menor absorção de nutrientes e água (FOY, 1974). Além disso, o pH baixo do solo resulta em alterações na disponibilidade de nutrientes, dificultando sua absorção (Figura 2).



**FIGURA 2.** Disponibilidade de nutrientes vegetais em relação ao pH do solo. Fonte: ITOGRASS (1998).

Em relação aos danos morfológicos, as raízes tornam-se curtas, grossas, frágeis, com ápices espessos, coifa deformada e coloração marrom (FOY, 1974; DELHAIZE & RYAN, 1995) (Figura 3).



**FIGURA 3.** Aspectos morfológicos de raízes de plântulas de trigo afetadas pelo Al do solo: (A) efeito do Al no crescimento das raízes; (B) microscopia eletrônica de varredura (MEV) do ápice radicular de variedades tolerante (B) e sensível (direita) ao Al do solo (C) (DELHAIZE & RYAN, 1995).

Não se sabe, exatamente, a partir de qual concentração na solução do solo o Al passa a ser tóxico para as plantas. Entretanto, espera-se que quantidades na ordem de alguns poucos  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Al sejam capazes de provocar alterações negativas na maioria das espécies vegetais, principalmente por afetar diretamente as raízes e lesar seu funcionamento normal, diminuindo a absorção de nutrientes e água (SOBRAL & GUIMARÃES, 1992).

As espécies e cultivares vegetais variam em relação à tolerância ao Al em solução, devido à diferentes mecanismos utilizados pelas plantas. Duas categorias de mecanismo de tolerância ao Al vem sendo propostas. A primeira, e bem menos conhecida, diz respeito a mecanismos de tolerância a grandes quantidades de Al no simplasto da raiz, que podem estar relacionados à quelação do Al no citosol, à compartimentação do Al nos vacúolos, à ligações Al-proteínas ou à evolução de enzimas tolerantes ao Al (TAYLOR, 1988). Há relatos da inexistência de relação entre a concentração de Al nos vacúolos e o índice de tolerância baseado no crescimento da raiz (ECHART & CAVALLI-MOLINA, 2001). A segunda categoria de mecanismo de tolerância ao Al está relacionada com a habilidade de excluir o Al do ápice da raiz, e envolve diferentes tipos de mecanismos como permeabilidade seletiva do Al na membrana plasmática, imobilização do Al nas paredes celulares, formação de uma barreira de pH induzida pela planta na rizosfera ou no apoplasto da raiz e a eliminação de ligantes quelados (TAYLOR, 1988). A exclusão de Al da extremidade das raízes pode ser obtida pela eliminação de ácidos orgânicos do ápice radicular. Está bem estabelecida a habilidade dos ácidos orgânicos de

quelatar e eliminar Al não-fitotóxico. Tem sido especulado que plantas tolerantes ao Al usam ácidos orgânicos para se desintoxicarem do  $Al^{3+}$ , tanto internamente como na rizosfera. FOY et al. (1978) propuseram um mecanismo de exclusão de Al que envolve o aumento do pH da rizosfera, reduzindo a concentração de  $Al^{3+}$  em favor de espécies de Al menos tóxicas, como os hidróxidos e os fosfatos de Al.

## **2.4 AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DAS PLANTAS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

A seleção de plantas tolerantes ao Al tem sido a alternativa mais usada para o aumento da produção em solos ácidos. Alguns dos métodos empregados incluem o cultivo da cultura de interesse em condições de campo ou em condições mais controladas de casa-de-vegetação ou laboratório, usando solo ou soluções nutritivas como substrato.

No método de cultura em campo, há a vantagem da seleção de germoplasma sob condições naturais de clima e solo, baseada na integração do resultado do estresse causado pela toxidez do Al e dos fatores associados ao solo e ao ciclo de crescimento completo do vegetal. Entretanto, o método de campo requer um tempo comparativamente longo em relação ao método de cultura em solução, constituindo uma desvantagem. Além disso, alterações simultâneas e não controladas que ocorrem na solução do solo com a modificação de seu nível de acidez e as raízes não são facilmente observáveis usando cultura em solo (ECHART, 2001).

A maioria dos trabalhos utiliza a técnica de cultivo de germoplasma em solução nutritiva. O meio hidropônico oferece vantagens como o pronto acesso ao sistema radicular e a possibilidade de monitoramento e controle do pH e das concentrações de Al e de outros íons relevantes à expressão das reações de sensibilidade e tolerância (ROSSIELLO & JACOB-NETTO, 2006). Nessa abordagem, o critério mais utilizado para medir a sensibilidade ao Al é a comparação do crescimento e/ou do peso das raízes de plantas crescidas em solução nutriente com pH ácido e uma concentração adequada de Al com plantas controles crescidas na ausência de Al. Outra opção é observar os

aspectos morfológicos da raiz sob influência do AI, através da microscopia óptica (ECHART, 2001).

### **3 OBJETIVOS**

O objetivo geral do estudo foi estudar a sensibilidade dos porta-enxertos cítricos Limoeiro Cravo (*Citrus limonia* Osbeck.), tangerina 'Sunki' (*C. sunki* Hort.

ex Tan.) e citrumelo Swingle (*Citrus paradisi* X *Poncirus trifoliata*) ao Al em solução.

Os objetivos específicos foram:

- a) avaliar o desenvolvimento radicular das variedades de citros em solução nutritiva em diferentes condições de estresse por Al;
- b) avaliar alterações de crescimento causadas pelos tratamentos, através da análise de biomassa seca de folhas, caule e raízes
- c) examinar alterações morfológicas nas raízes de porta-enxertos cítricos através de microscopia óptica.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA-UFSCar), no município de Araras-SP, no período de junho de 2012 a janeiro de 2013, em condições de laboratório.

## 4.1 SOLUÇÃO NUTRITIVA E TEMPO DE CULTIVO DAS MUDAS DE PORTA ENXERTO CÍTRICO

A adequada nutrição mineral das mudas de citros, antes de serem submetidas ao estresse por Al, foi feita por uma adaptação da clássica solução de Hoagland & Arnon, preparada com fundamento nos teores foliares de nutrientes considerados adequados para o citros (RAIJ et al.; 1996) (Tabela 1).

A composição e a concentração da solução nutritiva dos macro (Tabela 2) e dos micronutrientes (Tabela 3) adequadas para o citros foram calculadas conforme o método de Cometti et al. (2006). A solução nutritiva foi preparada de modo a fornecer às plantas condições que possibilitassem o fornecimento adequado de nutrientes conforme a necessidade das mudas, evitando danos no sistema radicular que não fossem causados pelo Al.

Antes do início do experimento, foi realizado um teste preliminar para observar o desenvolvimento das variedades de citros (*C. sunki* Hort. ex Tan.; *Citrus paradisi* X *Poncirus trifoliata* e *Citrus limonia* Osbeck.) em meio hidropônico. As mudas cítricas foram colocadas em solução nutritiva por 10 dias, para verificar sua adaptabilidade e garantir aclimatação à solução nutritiva. Foram utilizados três recipientes de 12 L, em cuja porção superior foram encaixadas pranchas de isopor contendo 5 mudas de cada variedade, com 10 cm de altura (Figura 4).

**TABELA 1.** Teores foliares de macro e de micronutrientes considerados adequados para a cultura do citros.

Nutriente	Teores foliares
<b>Macronutrientes (g kg<sup>-1</sup>)</b>	

N	23-27
P	1,2-1,6
K	10-15
Ca	35-45
Mg	2,5-4,0
S	2,0-3,0
<b>Micronutrientes (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	
B	36-100
Cu	4-10
Fe	50-120
Mn	35-300
Mo	0,1-10
Zn	25-100

*Fonte:* Raij et al. (1996)

**TABELA 2.** Fontes e concentrações de micronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de mudas cítricas.

Nutriente	Sal/Fertilizante	Concentração adotada mg L <sup>-1</sup>
B	Ácido bórico	0,30
Cu	Sulfato de cobre	0,03
Fe	Fe-EDTA	0,36
Mn	Sulfato de manganês	0,72
Mo	Molibdato de sódio	0,0021
Zn	Sulfato de zinco	0,27

**TABELA 3.** Fontes e concentrações de macronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de mudas cítricas.

Nutriente	Sal/Fertilizante	Concentração adotada g/1000 L
-----------	------------------	----------------------------------



N	Nitrato de cálcio	1621,1
K	Nitrato de potássio	274,0
P	Fosfato monoamônico (MAP)	52,4
Mg	Sulfato de magnésio	270,0

---



**FIGURA 4.** Ensaio preliminar com mudas cítricas acomodadas em pranchas de isopor para exposição do sistema radicular à solução nutritiva.

O sistema radicular foi mantido completamente submerso em solução nutritiva, oxigenada através de borbulhamento de ar comprimido por moto compressor. O sistema permaneceu sob iluminação artificial fluorescente constante de 5000 lux.

Após o teste preliminar, 40 mudas de cada variedade ficaram em aclimação por 20 dias, para se adaptarem ao meio e para as raízes alcançarem vigor, comprimento e uniformidade adequados para imersão em solução nutritiva adicionada de concentrações crescentes de Al. A aclimação ocorreu em 5 recipientes de 12 L cada, onde 24 mudas de Tangerina Sunki, Citromelo Swingle e Limoeiro Cravo (*C. sunki* Hort. ex Tan.; *Citrus paradisi* X *Poncirus trifoliata* e *Citrus limonia* Osbeck) foram acomodadas em placas de isopor para fixação e exposição do sistema radicular.. A solução foi trocada semanalmente, de modo

a manter o nível nutricional. O sistema também foi oxigenado e submetido à iluminação constante da mesma forma que o teste preliminar. Em 20 dias, as plantas foram consideradas aptas para serem submetidas aos tratamentos contendo quantidades crescentes de Al, ocasião em que tiveram seu comprimento inicial medido (SANTOS et al., 1999).



**FIGURA 5.** Mudanças cítricas em período de aclimatação, com sistema radicular imerso em solução nutritiva, sistema de oxigenação e iluminação artificial.

#### **4.2 FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Após o período de vinte dias de imersão em solução, foram selecionadas 30 mudas para cada porta enxerto, com uniformidade radicular. As mudas foram submetidas a concentrações crescentes de Al, com 6 réplicas cada. O experimento de exposição do sistema radicular das mudas de citros às condições de estresse por Al foi desenvolvido em recipientes de PVC rígido, de 10 cm de diâmetro, 20 cm de altura e capacidade de 1,2 L. O fundo de cada recipiente foi fechado com caps, vedado com cola especial para PVC e silicone para evitar vazamentos. Em cada recipiente foram acondicionadas 6 plantas, fixadas em placas de EVA.



**FIGURA 6.** Mudanças cítricas fixadas em placas de EVA, para exposição do sistema radicular ao Al em solução; conjunto submetido a aeração e a iluminação artificial.

As plântulas foram transferidas para os recipientes contendo solução nutritiva e doses de Al, fornecido na forma de  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  nas concentrações de 0; 7,5; 15, 22,5 e 30,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de Al, constituindo respectivamente os tratamentos T1 (testemunha), T2, T3, T4 e T5 (SANTOS et al., 1999).

A composição da solução foi alterada e renovada quinzenalmente, oxigenada diariamente, sendo o pH da solução de cada tratamento corrigido a cada dez dias com adição de  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  para o valor 4,0, de modo a garantir o predomínio da espécie trivalente livre de Al ( $\text{Al}^+$ ).

### **4.3 TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS RAÍZES À SOLUÇÃO CONTENDO ALUMÍNIO**

O período de exposição das raízes das mudas de diferentes porta-

enxertos ao Al em solução foi de 30 dias e consistiu em modificação do método preconizado por Santos et al. (1999), que submeteram raízes de mudas cítricas ao Al solução por 84 dias. A adoção do período de 30 dias foi baseada no trabalho de Stolf et al. (2008), para quem o período de exposição de raízes ao Al por 20 dias é suficiente para discriminar genótipos quanto a sensibilidade ao Al. Após o período de 30 dias, as raízes pivotantes foram medidas (comprimento final – Cf) para avaliar o efeito do Al em solução sobre o crescimento radicular.

## **4.4 AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES RADICULARES CAUSADAS PELA EXPOSIÇÃO AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

### **4.4.1 DANOS MORFOLÓGICOS**

Os danos morfológicos causados pela exposição ao Al em solução foram observados através da microscopia óptica, com microscópio ótico Bioval modelo L2000C. Em seguida, procederam-se registros fotográficos dos ápices radiculares.

### **4.4.2 ANÁLISE DA MASSA SECA**

Para análise de massa seca, realizou-se a separação das partes das plantas (folhas, caule e raiz) (Figura 7), que foram colocadas separadamente em sacos de papel devidamente identificados de acordo com a variedade e o tratamento. Os sacos de papel contendo as amostras ficaram em estufa a 65° C. Após o período de 72 horas, as amostras foram pesadas em balança de precisão.



**FIGURA 7.** Separação de folhas, caule e raiz para análise de massa seca.

#### **4.4.3 ESTIMATIVAS DAS TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR (ROSSIELO & JACOB NETO, 2006)**

Os comprimentos das raízes pivotantes foram registrados biometricamente, para obtenção de dois grupos de medidas do comprimento inicial ( $C_i$ ):

- a)  $C_i (Al_0)$ : comprimento inicial (mm) da raiz pivotante, antes da exposição à solução sem Al;
- b)  $C_i (Al_x)$ : comprimento inicial (mm) da raiz pivotante, antes da exposição à solução com concentração "x" de Al.

Após trinta dias de exposição ao stresse causado pelo alumínio, o comprimento das raízes pivotantes foi novamente aferido, obtendo-se:

- a)  $C_f (Al_0)$ : comprimento final (mm) da raiz pivotante, após a exposição à solução sem Al;
- c)  $C_f (Al_x)$ : comprimento final (mm) da raiz pivotante, após a exposição à solução com concentração "x" de Al.

Com as medidas iniciais e finais de comprimento radicular, foram calculadas as taxas de alongamento (TA):

$$TA_{Al_0} = \frac{Cf_{Al_0} - Ci_{Al_0}}{Tf - T_0}$$

$$TA_{Al_x} = \frac{Cf_{Al_x} - Ci_{Al_x}}{Tf - T_0}$$

em que a TA é a taxa de alongamento expressa em mm dia<sup>-1</sup>; Tf-T<sub>0</sub> representa o intervalo de tempo desde o início dos tratamentos com Al. Os valores absolutos das taxas de alongação dos controles foram comparados diretamente com os do tratamento.

#### 4.5 FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido as condições controladas em laboratório, o experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial 5x3 (5 concentrações de Al em solução e 3 variedades de porta enxerto cítrico), com seis réplicas. As variedades de citros mais tolerantes ao Al em solução foram avaliadas pelos seguintes critérios:

- a) resultados da taxa de alongamento radicular foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de *Tukey*, ao nível de 5% de significância, para a identificação de diferenças significativas entre os tratamentos e porta enxertos;
- b) parâmetros morfológicos do Al nos tecidos radiculares, foram explorados na forma de imagens por registro fotográfico das observações ao microscópio óptico;
- c) a análise de massa seca foi demonstrada através de representação gráfica, comparando-se as três variedades e os cinco tratamentos.

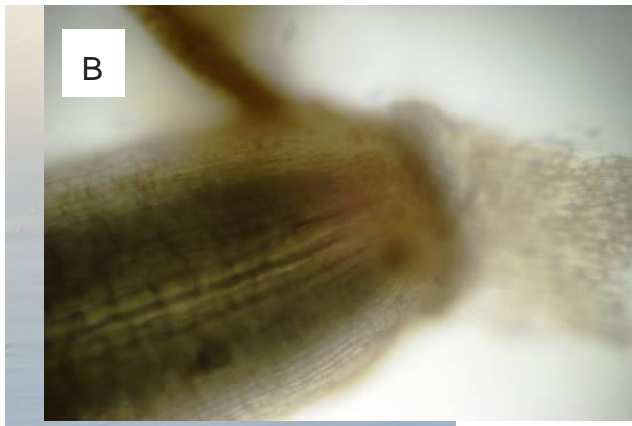
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 MICROSCOPIA ÓPTICA DE ÁPICES RADICULARES DE MUDAS DE PORTA ENXERTOS CÍTRICOS SUBMETIDAS AO ESTRESSE POR ALUMÍNIO

Normalmente, o exame microscópico dos ápices radiculares submetidos ao Al revela alterações morfológicas típicas (Lagos et al., 1991; Dornelles et al., 1996), tais como a aparência engrossada e escurecida (amarronzada), o aspecto retorcido, deformado e quebradiço, colapso da coifa, perda de células da epiderme, produção de mucilagem, etc. (Oliveira, 2012).

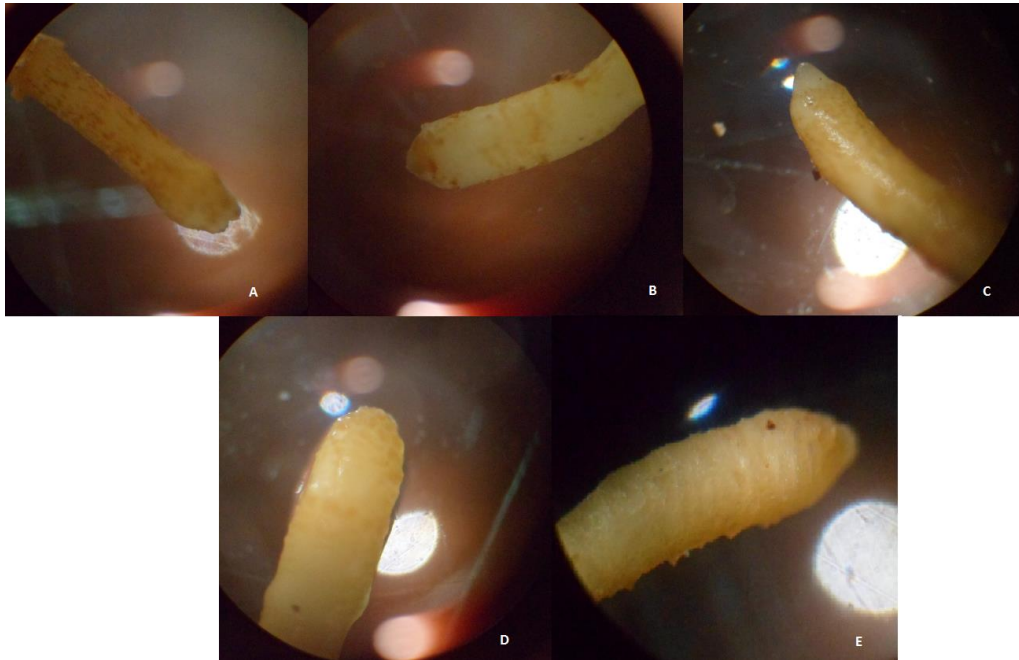
Genótipos de culturas de ciclo anual geralmente apresentam este conjunto de sintomas após poucos dias de exposição ao Al (Figura 8). Por exemplo, Lima (2011) observou que a coifa das raízes das variedades de milho AG 8061 e Dow 2B655 começou a ser afetada nas concentrações de 111 e 444  $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ , respectivamente. As variedades DKB 747 e Al Bandeirante tiveram deformações na coifa somente quando expostas à concentração mais elevada de Al em solução (666  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ).

Entretanto, as imagens captadas da microscopia óptica de ápices radiculares das mudas cítricas não mostraram alterações morfológicas evidentes com a elevação da concentração de Al em solução (Figuras 9, 10 e 11). Somente o ápice radicular de Tangerina Sunki submetido a 30  $\text{mg L}^{-1}$  de Al apresentou danos perceptíveis em sua morfologia (Figura 11). A ausência de modificações das raízes foi atribuída ao provável curto período (30 dias) de sua exposição às soluções contendo quantidades crescentes de Al. Santos et al. (1999) avaliaram a influência de níveis de Al sobre porta-enxertos Limoeiro Cravo e Citrumelo Swingle, submetendo as mudas ao estresse por Al durante 84 dias. Matiello et al. (2009) obtiveram resultados da influência do Al sobre o sistema radicular dos clones Mtl 25 e Mtl 27 de café conilon (*Coffea canephora*) e da variedade de café Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*) após 95 dias de contato com soluções nutritivas contendo Al.



**FIGURA 8.** Ápice radicular da variedade SP81-3250 de cana-de-açúcar após exposição a  $1400 \mu\text{mol L}^{-1}$  de Al (Malvestiti, 2011); (B) Ápice radicular da variedade RB928064 de cana-de-açúcar após exposição a  $2000 \mu\text{mol L}^{-1}$  de Al (Oliveira, 2012); (C) Ápice radicular da variedade AG 8061 de milho após exposição a  $444 \mu\text{mol L}^{-1}$  de Al (Lima, 2011); (D) Ápice radicular da variedade BRS Valiosa de soja após exposição a  $8 \text{ mg L}^{-1}$  de Al (Coghi, 2012).

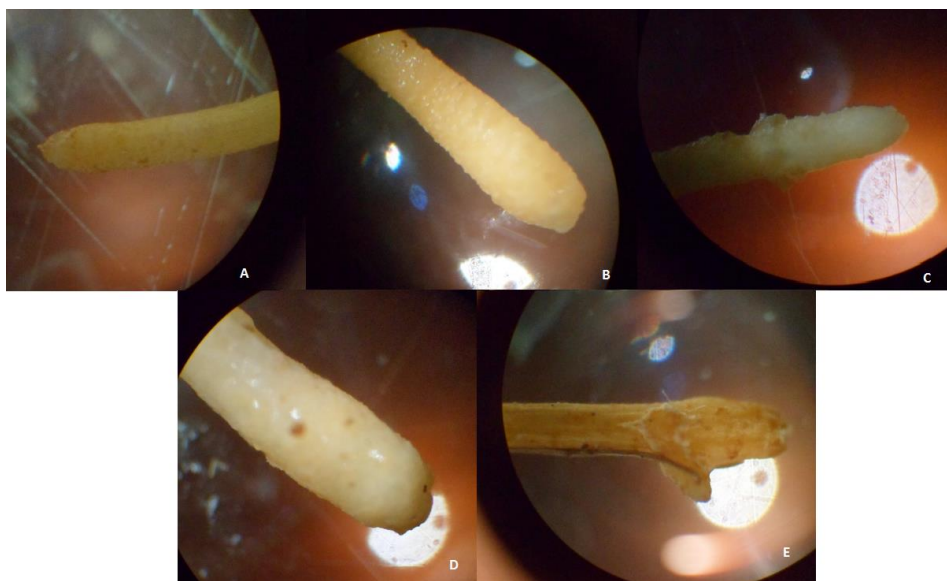




**FIGURA 9.** Imagens de microscopia óptica de ápices radiculares de porta-enxerto Citromelo Swingle submetidos a tratamentos com Al em solução; A: tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; B: tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; C: tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; D: tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; E: tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.



**FIGURA 10.** Imagens de microscopia óptica de ápices radiculares de porta-enxerto Limoeiro Cravo submetidos a tratamentos com Al em solução; A: tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; B: tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; C: tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; D: tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; E: tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.



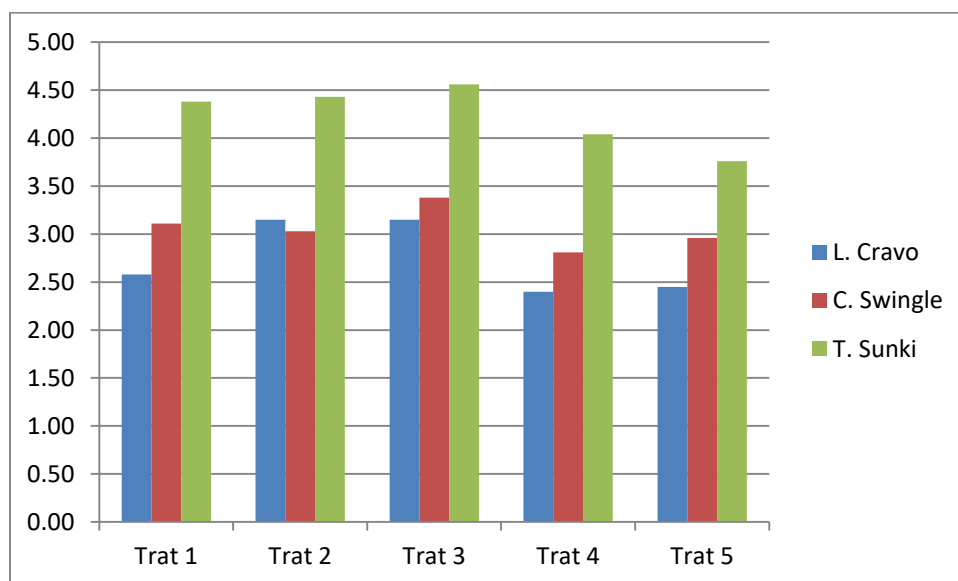
**FIGURA 11.** Imagens de microscopia óptica de ápices radiculares de porta-enxerto Tangerina Sunki submetidos a tratamentos com Al em solução; A: tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; B: tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; C: tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; D: tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; E: tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.

Ainda que para Stolf et al. (2008) um período de 20 dias de exposição de raízes ao Al seja suficiente para a expressão da sensibilidade ao estresse, neste experimento o período de 30 dias não foi o bastante para causar injúrias visíveis ao sistema radicular das mudas cítricas.

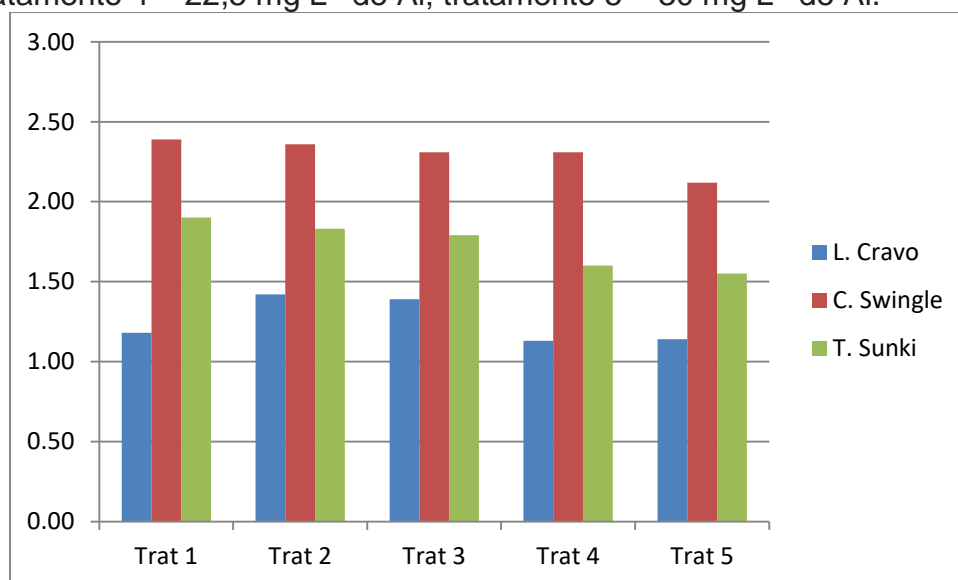
## **5.2 BIOMASSA SECA DE MUDAS DE PORTA ENXERTOS CÍTRICOS SUBMETIDAS AO ESTRESSE POR ALUMÍNIO**

O porta-enxerto de Tangerina Sunki apresentou maior acúmulo de biomassa quando comparado com o Limoeiro Cravo e com o Citrumelo Swingle (Figuras 12, 13 e 14). Independentemente do porta enxerto, houve decréscimo de biomassa seca de folhas (Figura 12), de caules (Figura 13) e de raízes (Figura 14) das mudas cítricas com o aumento da concentração de Al em solução, sobretudo a partir da concentração de 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al. Plantas de Citrumelo Swingle foram menos afetadas quanto ao acúmulo de biomassa no caule na presença do Al (Figura 13). Santos et al. (1999) relataram que a partir da adição de 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al em solução nutritiva, ocorreram alterações fisiológicas e reduções significativas no acúmulo de macronutrientes e na massa seca de

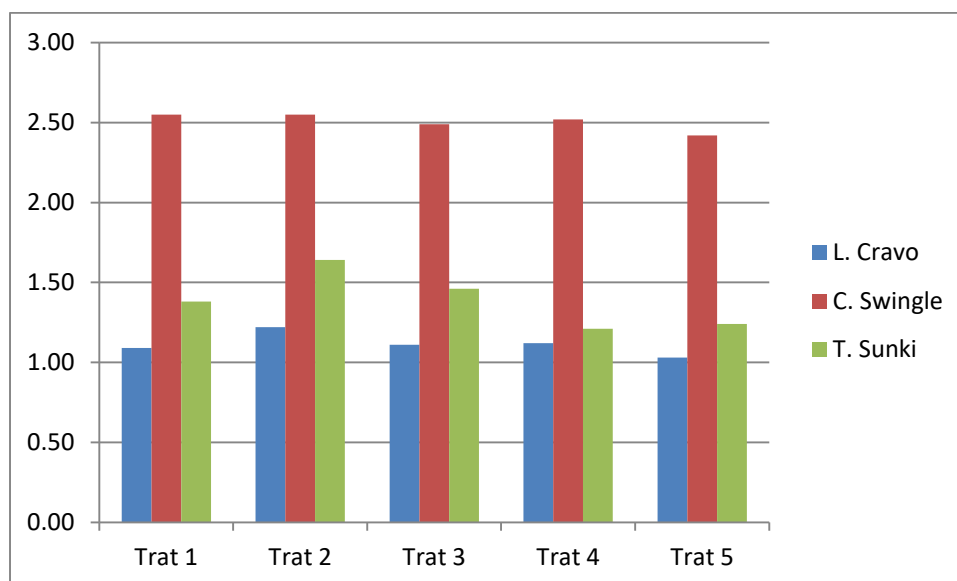
folhas, caules e raízes de mudas cítricas produzidas em porta-enxerto Citrumelo Swingle.



**FIGURA 12.** Biomassa seca de folhas dos porta-enxertos Limoeiro Cravo, Citrumelo Swingle e Tangerina Sunki submetidos ao estresse por Al; tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.



**FIGURA 13.** Biomassa seca de caule dos porta-enxertos Limoeiro Cravo, Citrumelo Swingle e Tangerina Sunki submetidos ao estresse por Al; tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.



**FIGURA 14.** Biomassa seca de raízes dos porta-enxertos Limoeiro Cravo, Citrumelo Swingle e Tangerina Sunki submetidos ao estresse por Al; tratamento 1 – 0 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 2 – 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 3 – 15 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 4 – 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al; tratamento 5 – 30 mg L<sup>-1</sup> de Al.

Apesar de as mudas sobre Limoeiro Cravo terem apresentado a mais baixa produção de biomassa (Figuras 12, 13 e 14), houve incremento da massa seca da parte aérea nas doses 7,5 e 15,0 mg L<sup>-1</sup> de Al. Segundo Foy et al. (1978), para algumas espécies, o Al tem efeito tóxico apenas em concentrações elevadas, podendo ser até benéfico para alguns genótipos. Nas maiores concentrações de Al (22,5 e 30,0 mg L<sup>-1</sup> de Al), a produção de biomassa no Limoeiro Cravo foi semelhante à obtida no tratamento testemunha. Neste contexto, dentre os três porta enxertos estudados, o Limoeiro Cravo foi menos sensível à presença do Al quanto ao parâmetro acúmulo de biomassa. O comportamento não condiz com o observado por Magalhães (1987) para o acúmulo de biomassa de parte aérea do Limão Cravo, severamente afetado por níveis de Al que variaram de 20 a 80 mg L<sup>-1</sup> de Al. Entretanto, o Limoeiro Cravo foi apontado por Pompeu Jr. (1991) como o porta enxerto de maior adaptação às diferentes condições de estresse impostas pelo meio.

Plantas de Tangerina Sunki foram consideradas as mais sensíveis ao Al em solução, já que o decréscimo da biomassa de caule, folhas e raízes foi o mais perceptível, sobretudo a partir da concentração de 22,5 mg L<sup>-1</sup> de Al (Figuras 12, 13 e 14). Este efeito foi observado por Nogueira et al. (1989) não somente

em mudas de Tangerina Sunki, mas também de Tangelo Orlando.

A influência do Al sobre o sistema radicular foi considerado o parâmetro mais relevante, já que o comprometimento das raízes repercute em importantes processos do ciclo vegetal, principalmente na absorção de água e de nutrientes. O acúmulo de biomassa de raízes dos porta enxertos Limão Cravo e Citrumelo Swingle não foi afetado pelo contato com o Al em solução (Figura 14). O comportamento das plantas de Tangerina Sunki, ou seja, o decréscimo da biomassa de raízes a partir da exposição ao Al, é relatado com mais frequência na literatura (Magalhães, 1987; Nogueira et al., 1989). Lin & Mihre (1990) constataram diminuição do peso das raízes de citros em torno de 60%, quando a concentração de Al foi de 35 mg L<sup>-1</sup>. É discutível se o tempo de exposição das raízes de Limão Cravo e de Citrumelo Swingle foi suficiente para afetar a biomassa de raízes.

### 5.3 TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR

Os resultados da taxa de alongamento radicular foram submetidos à análise de variância (Tabela 4) para atestar a consistência das constatações feitas a partir da Figura 14.

**TABELA 4.** Resumo da análise de variância (ANOVA) de taxa de alongamento radicular de porta enxertos de citros submetidos à concentrações crescentes de Al em solução.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F	
Tratamentos	4	0,2296	0,0574	94,48	**
Porta-enxertos	2	0,0362	0,0181	29,82	**
Interação tratamento x porta-enxerto	8	0,0349	0,0044	7,18	**
Tratamentos	14	0,3007	0,0215	35,36	**
Resíduo	75	0,0456	0,0006		
Total	89	0,3462			

Significância: \*\* 1%; \* 5%, + 10%; ns: não significativo.

Houve alta significância estatística tanto para a influência isolada dos fatores testados (doses de Al e porta enxertos), quanto para a interação dos fatores (doses de Al x porta enxertos). O teste de comparação de médias (Tukey

a 5%) foi aplicado para os porta enxertos e para as concentrações de Al em solução (Tabela 5).

**TABELA 5.** Médias de taxa de alongamento radicular (mm) de porta-enxertos de citros submetidas à concentrações crescentes de Al em solução.

[Al], mg L <sup>-1</sup>	L. Cravo	C. Swingle	T. Sunki	Média
0,0	0,217 a A	0,250 a A	0,167 a B	0,211 a
7,5	0,189 ab B	0,244 a A	0,133 ab C	0,189 a
15,0	0,150 bc A	0,117 b AB	0,106 bc B	0,124 b
22,5	0,133 c A	0,117 b AB	0,089 c B	0,113 b
30,0	0,067 d A	0,078 b A	0,078 c A	0,074 c
Média	0,151 A	0,161 A	0,114 B	0,142

Letras iguais indicam não significância, minúsculas na coluna, maiúsculas na linha.

Os porta enxertos Limão Cravo e Citrumelo Swingle apresentaram taxa de crescimento radicular estatisticamente superior ao porta enxerto Tangerina Sunki quando submetidos ao Al em solução. A sequência dos porta enxertos quanto à tolerância ao Al em solução foi a seguinte: Citrumelo Swingle = Limoeiro Cravo > Tangerina Sunki.

Decréscimos significativos na taxa de alongamento radicular foram observados a partir da concentração de 15 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 5), considerado, neste estudo, valor crítico a partir do qual tem início a influência do Al sobre o desenvolvimento radicular inicial de mudas cítricas. Essa concentração crítica aponta para a provável suscetibilidade dos porta enxertos estudados à concentrações iônicas de Al superiores aquelas consideradas típicas na solução de solos ácidos, que normalmente estão entre 4,0 e 5,5 mg L<sup>-1</sup> (150 e 200 μmol L<sup>-1</sup>) (ROSSIELLO & JACOB NETTO, 2006). Avaliando o crescimento de diversos porta enxertos cítricos, submetidos ao estresse por alumínio em cultivo hidropônico, Pereira et al. (2003) verificaram que o crescimento do sistema radicular diminuíram em todos os porta-enxertos em presença de alumínio, sendo que, no limoeiro 'Cravo', esse decréscimo foi mais acentuado, principalmente no sistema radicular, diminuindo o crescimento a partir de 7,5 mg L<sup>-1</sup> de Al, sendo esse porta-enxerto o mais sensível em relação a todos os caracteres de crescimento considerados.

Nogueira et al. (1989) mostraram diminuição do comprimento das raízes quando utilizados níveis superiores a  $15 \text{ mg L}^{-1}$ , bem como com os obtidos por Magalhães (1987) quando os níveis variaram entre 20 e  $80 \text{ mg L}^{-1}$ , visto que acima destes as plantas cítricas não apresentavam mais crescimento e desenvolvimento.

O valor crítico da concentração de Al em solução, e que influencia o desenvolvimento radicular, depende de cada espécie vegetal e até mesmo da variedade (Evans & Kamprath, 1970). Por isso, não existe um valor crítico único para a concentração de Al. Lima (2011) encontrou que a concentração de  $111 \mu\text{mol Al L}^{-1}$  ( $3 \text{ mg L}^{-1}$  de Al) foi suficiente para causar alterações morfológicas das raízes na variedade de milho AG 8061, o que inclui a produção de calose e o colapso e a deformação da coifa. Para as variedades de milho Al. Bandeirante, DKB 747 e Dow 2B655, injúrias fisiológicas nos ápices radiculares foram causadas por concentrações de Al em solução superiores a  $444 \mu\text{mol Al L}^{-1}$  ( $12 \text{ mg L}^{-1}$  de Al). Já Mazzocato et al. (2002) constataram que a concentração crítica de Al em solução foi de  $222 \mu\text{mol L}^{-1}$  e sugeriram a concentração de  $162 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$  como a mais adequada para caracterização de tolerância em híbridos de milho. Para Malvestiti (2011), a concentração de  $380 \mu\text{mol L}^{-1}$  de Al foi crítica para iniciar injúrias ao sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar RB855156, SP81-3250 e RB935744. Entretanto, para um conjunto mais amplo de variedades de cana-de-açúcar avaliado por Oliveira (2012) (RB928064, RB966928, RB937570, RB855156, RB855453, RB935744, RB867515, RB925345 e SP813250), o valor crítico de Al em solução variou de 130 a  $3000 \mu\text{mol L}^{-1}$ . A concentração crítica média de Al em solução que deu início ao processo de decréscimo do alongamento radicular de três variedades de soja estudadas por Coghi (2011) (BRS Valiosa, Monsoy 7211 e Tomoko) foi de  $1 \text{ mg de Al L}^{-1}$ . As principais alterações morfológicas das raízes, ou seja, a produção de calose e o colapso e a deformação da coifa, foram observadas a partir da concentração de  $2 \text{ mg de Al L}^{-1}$  para a variedade BRS Valiosa. As raízes das variedades Monsoy 7211 e Tomoko apresentaram alterações morfológicas na concentração mais baixa de Al em solução ( $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ ).

## **6 CONCLUSÕES**

Para porta enxertos cítricos: limoeiro Cravo (*Citrus limonia* Osbeck.), tangerina 'Sunki' (*C. sunki* Hort. ex Tan.) e citrumelo Swingle (*Citrus paradisi* X *Poncirus trifoliata*) , nas condições experimentais em que este estudo foi conduzido, concluiu-se que:

- o aumento da concentração de Al em solução causou diminuição da taxa de alongamento radicular ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) dos três porta enxertos cítricos;
- a concentração crítica de Al em solução para a taxa de alongamento radicular dos porta enxertos cítricos foi de  $15 \text{ mg Al L}^{-1}$ ;
- o período de 30 dias de exposição das raízes dos porta enxertos ao Al em solução não foi suficiente para promover alterações morfológicas visíveis ao sistema radicular;
- as mudas de Limoeiro Cravo foram as menos sensíveis à presença do Al quanto ao parâmetro acúmulo de biomassa; as mudas de Citrumelo Swingle foram menos afetadas quanto ao acúmulo de biomassa no caule na presença do Al; as mudas de Tangerina Sunki apresentaram o maior decréscimo de biomassa de raízes a partir da exposição ao Al;
- a biometria de raízes indicou a seguinte sequência dos porta enxertos quanto à tolerância ao Al em solução: Citrumelo Swingle = Limoeiro Cravo > Tangerina Sunki.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



ABECITRUS. Associação Brasileira dos Exportadores de Cítricos. Disponível em:<<http://www.abecitrus.com.br>>. Acesso em: 10 set. 2012.

ABRÊU, F. L. G. **Avaliação de sistema radicular de porta-enxertos para lima.** 2005. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2005.

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. **Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes.** In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, L., Aracaju, 1999. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA, 1999. p.57-87.

ARATANI, R. G., et al. **Qualidade física de um latossolo vermelho aciférico sob diferentes sistemas de uso de manejo.** Rev. Bras. Ciênc. Solo. Viçosa. 33: 677-687,2009.

BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C., BISSANI, C.A., TEDESCO, M.J. (eds.) **Princípios de fertilidade de solo.** Porto Alegre : Dep. de Solos. Fac. de Agronomia. UFRGS, 1995. p.51-76.

CANAL, I.N. & MIELNICZUK, J. Parâmetros de absorção de potássio em milho (*Zea mays L.*), afetados pela interação alumínio – cálcio. **Ciência e cultura**, v. 35, n.3, p. 336-340, 1983

COGHI, R. Sensibilidade de variedades de soja (*Glycine max*) ao alumínio em solução. 2012. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2012.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; HERNANDES FILHO, P.; FLORENZANO, T. DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. **Aluminium toxicity and tolerance in plants.** Plant Physiology, v. 107, p. 315-321, 1995.

- ECHART, C. L. & CAVALLI-MOLINA, . **Fitotoxicidade do alumínio:efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético.** *Cienc. Rural* [online]. 2001, vol.31, n.3 [cited 2013-01-23], pp. 531-541
- ESALQ. **Origem, dispersão e evolução da citricultura** Disponível em: <<http://www.lpv.esalq.usp.br/lpv661/Origem,%20dispersao%20e%20evolucao%20da%20citricultura%202012.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2012.
- ESTANISLAU, A.A.; BARROS, F.A.S.; PENA, A.P.; SANTOS, S.C.; FERRI, P.H.; PAULA, J.R. 2001. **Composição química e atividade antibacteriana dos óleos essenciais de cinco espécies de Eucalyptus cultivadas em Goiás.** *Rev. Bras. Farmacognosia* 11: 95-100
- FAO/WHO/UNU. **Human energy requirements.** Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. Rome: Food and Agriculture Organization, 2003.
- FOY, C.D. & FLEMING, A.L. **The physiology of plant tolerance to excess available aluminum an manganese in acid soils.** In: JUN, G. A. (ed.). *Crop tolerance to subotinal land conditions.* Madison: ASA/CSSA/SSSA. p.301-343. (Special Publication; n.32), 1978.
- FOY, C.D. **Effects of aluminum on plant growth.** In: **Carson, E.W. (Ed.). The plant root and its environment.** Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.
- FOY, C.D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. **The physiology of metal toxicity in plants.** *Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, Review Biology* v. 29, p. 511-566, 1978
- DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e o ordenamento territorial.** Ministério da Ciência e Tecnologia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, jun. 2001.

Disponível em: <[www.dsr.inpe.br/dsr/simeao/publicacoes/sergiszee3.pdf](http://www.dsr.inpe.br/dsr/simeao/publicacoes/sergiszee3.pdf)>.

Acesso em: 20 jul. 2012.

KARLEN, D.L. & Stott, D.E. **A Framework For Evaluating Physical, End Chemical Indicators Of Soil Quality**. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicsek, D.F. & Stewart, B.A. Eds. *Defining Soil Quality For A Sustainable Environment*. Madison, Sssa, 1994. P.53-71. (Special. Publication, 35) .

KEMPER, B. Soil compaction and root growth in Paraná. In: RUSSEL, R.S.; IGHE, K.; MEHTA, Y.R. **The soil/root system in relation to brazilian agriculture**. Londrina: Fundação IAPAR, 1981. p. 81-101.

LIMA, D.L.S. Sensibilidade de variedades de milho (*Zea mays*) ao alumínio em solução. 2011. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2011.

MALVESTITI, J.A. Sensibilidade de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) ao alumínio em solução avaliada por corantes indicadores. 2011. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2011.

MARSCHNER, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. In: R.J. Wright, V.C. Baligar, and R.P. Moorman (eds), **Plant-soil interactions at low pH. Proceedings of the Second International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH**, June 24 –29, 1990, Beckley, West Virginia, USA. Kluwer Academic Publisher. p 683–702.

MASSOT, N.; LLUGANY, M.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELO, J. **Callose production as indicator of aluminium toxicity in bean cultivars**. *Journal of Plant Nutrition*, v.22, p. 1-10, 1999.

MOREAU, A. G. F.; MOREAU, C. **La Vie des Plantes**. Lisboa: Editora Verbo, 1971.

- MOREIRA, C.S. **Estudo da distribuição do sistema radicular da laranjeira 'Pera' *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, com diferentes manejos de solos.** 1983. 97f. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.
- MUGGLER, C. C. et al. **Conteúdos básicos de geologia e pedologia.** Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/10/Apostila-Vi%C3%A7osa.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2012.
- NAIDOO G., STEWART, J.M., LEWIS, RJ (1978) **Accumulation sites of A1 insnapbean and cotton roots.** Agron J 70 489-492.
- NOGUEIRA, P. **Reflorestamento heterogêneo com essências indígenas.** São Paulo: Instituto Florestal, 1977. 71 p. (Bol. Técn. IF, 24).
- NOGUEIRA, S.S.; NAGAI, V.; CARELLI, M.L.C.; FAHL, J.J. Comportamento de porta-enxertos de citros em presença de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.6, p.711-716, 1989.
- NUNES, M.A.; MATOS, C.M.; AZINHEIRA, H.G.; QUARTIN, V.L. **Indirects effects of aluminium on photosynthesis and mineral concentration in triticales.** In: MATHIS, P. Photosynthesis: from light to biosphere. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1995. v.4, p.713-716.
- OLIVEIRA, M. de S. Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) ao alumínio em solução. 2012. 112 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2012.
- PACE, C.A.M.; ARAÚJO, C.M. **Estudo da distribuição do sistema radicular de porta-enxertos cítricos em solos podzolizados e sua relação com a formação de copas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

FRUTICULTURA, 8., Brasília, 1986. Anais. Brasília: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1986. v.1, p.199-205.

PEDROTTI, A. & DIAS Jr., M.S. **Compactação do solo: como evitá-la.** Agropec. Catarinense, 9:50-52, 1996.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A. & CRESTANA, S. **Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo.**R. Bras. Ci. Solo, 25:521-529, 2001.

POMPEU JUNIOR, J.; Porta enxertos. In: RODRIGUEZ, O.; VIEGAS, F.; POMPEU JUNIOR, J.; AMARO, A.A.; **Citricultura Brasileira.** 2.ed. Campinas, Fundação Cargill, 1991. v. 1, p. 265-280.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. **Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, 2000. p. 929-938.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC,1996. (Boletim Técnico, 100).

REZENDE, J. de O.; MAGALHÃES, A. F. de J.; SHIBATA, R. T. ; ROCHA, E. S.; FERNANDES, J. C.; BRANDÃO, F. J. C.; REZENDE, V. J. R. P. **Citricultura nos solos coesos dos tabuleiros costeiros: análise e sugestões.** Salvador: SEAGRI/SPA, 2002, 97p. (Série Estudos Agrícolas, 3).

REZENDE, J. de O.; MAGALHÃES, A. F. de J.; SHIBATA, R. T. ; ROCHA, E. S.; FERNANDES, J. C.; BRANDÃO, F. J. C.; REZENDE, V. J. R. P. **Citricultura nos solos coesos dos tabuleiros costeiros: análise e sugestões.** Salvador: SEAGRI/SPA, 2002, 97p. (Série Estudos Agrícolas, 3).

- ROSSIELLO, R.O.P.; JACOB NETTO, J. **Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema.** In: Fernandes, M.S. (Ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.375-418.
- SALET, R.L. et al. Atividade do Alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, p.9-13, 1999).
- SANTOS, C. H.; FILHO G. H.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Dos et al. **Aluminum levels and macronutrient accumulation in citrus rootstocks in hydroponic solution.** *Scientia Agricola*, Botucatu, v. 56, n. 4, p.1165-1175, 05 out. 1999.
- SCHÄFER, G.; DORNELLES, A.L.C. **Produção de mudas cítricas no Rio Grande do Sul - Diagnóstico da região produtora.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.4, p.587-592, 2000.
- SEMPIONATO, O.R.; STUCHI, E.S. & DONADIO, L.C. **Viveiro de citros.** Jaboticabal: Funep, 1997b. 40p. (Boletim Citrícola, 2)
- SIMÃO, S. **Tratado de fruticultura.** Piracicaba: FEALQ, 1998. 760p
- SIMON, L.; SMALLEY, T.J.; JONES, J. B.; LASSEIGNE, F.T. **Aluminium toxicity in tomato. Part 1. Growth and mineral nutrition.** *Journal of Plant Nutrition*, v.17, p.293-306, 1994.
- SOARES, T. M. **Desenvolvimento de três porta-enxertos cítricos utilizando águas salinas.** 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ,, Piracicaba, 2003.
- SOBRAL, A. F.; GUIMARÃES, V.O.DA S. **Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana de açúcar (*Saccharum spp.*).** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, p. 287-292, 1992.

- STOLF, E.C. et al. Estabelecimento de critérios para selecionar porta-enxertos de macieira tolerantes ao alumínio em solução nutritiva. Rev. Bras. Frutic. 2008, v.30, n.2, p. 476-481.
- TAYLOR C.W. (1988) **Various approaches to and definitions of creativity**. In The Nature of Creativity: Contemporary Psychological Perspectives, RJ Sternberg (ed), pp 99–124. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- TORMENA, C.A. & ROLLOF, G. **Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto**. R. Bras. Ci. Solo, 20:333-339, 1996.
- VASCONCELLOS, L.A.B.C. **Comportamento de porta-enxertos de citros (*Citrus* spp) em três tipos de solos com diferentes níveis de alumínio e manganês**. Piracicaba, 1987. 108p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- VIOLANTE, A.; VIOLANTE P. 1980. **Influence of pH, concentration, and chelating power of organic anions on the synthesis of aluminum hydroxides and oxyhydroxides**. Clays and Clay Minerals, Vol 28, nº 6: 425-434.
- WALLACE, S.U.; ANDERSON, I.C. (1984), **Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots**. Agron J 76 5-8
- ZHAO, X.-J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, E.J. **Al<sup>3+</sup> and Ca<sup>2+</sup> alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells**. Plant Physiology, Rockville, v.83, p.159-162, 1987.