

WALTER ESFRAIN PEREIRA

TROCAS GASOSAS, FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA, CRESCIMENTO E
COMPOSIÇÃO MINERAL DE QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS
SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO, EM CULTIVO HIDROPÔNICO

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Fitotecnia, para
obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2001

Lista de variáveis, símbolos e unidades

<u>Variável</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>
Área acima da curva de fluorescência	AAC	Unidade relativa
Área foliar	AF	cm ² planta ⁻¹
Área total do sistema radicular	ATSR	cm ² planta ⁻¹
Comprimento total do sistema radicular	CTSR	cm planta ⁻¹
Concentração interna de CO ₂	C _i	μmol mol ⁻¹
Condutância estomática	g _s	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Discriminação isotópica de carbono	δ	‰
Eficiência fotossintética do uso da água	EFUA	μmol CO ₂ mmol H ₂ O ⁻¹
Massa de matéria seca do caule	MMSC	mg planta ⁻¹
Massa de matéria seca foliar	MMSF	mg planta ⁻¹
Massa de matéria seca radicular	MMSSR	mg planta ⁻¹
Relação de área foliar	RAF	cm ² g ⁻¹
Relação de massa foliar	RMF	mg mg ⁻¹
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial	F _v /F ₀	Adimensional
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima	F _v /F _m	Adimensional
Relação raiz parte aérea com base na massa de matéria seca	RRPA	mg mg ⁻¹
Taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta	TRC	mg mg ⁻¹ dia ⁻¹
Taxa de fotossíntese líquida	A	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
Taxa transpiratória	E	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Teor de clorofila <i>a</i>	Chl _a	mg g ⁻¹
Teor de clorofila <i>b</i>	Chl _b	mg g ⁻¹
Teor de clorofila total	Chl _t	mg g ⁻¹

À minha esposa, Claudia.

*Aos meus filhos, Ivan Javier, Magalí Haidée, Pedro Adrián e
Lucas Hariel.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade oferecida para a realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Programa de Estudantes Convênio–Pós-Graduação (CNPq, PEC-PG), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dalmo Lopes de Siqueira, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos e principalmente pela amizade.

Aos professores Mário Puiatti e Carlos Alberto Martínez y Huaman, pela atenção, pelos ensinamentos e pelo aconselhamento.

Aos professores Luiz Carlos Chamhum Salomão e Paulo Roberto Cecon, pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao professor Flávio Alencar D'Araújo Couto, pela orientação durante o curso de mestrado e pela amizade.

Ao professor José Maria Moreira Dias, pela amizade e pelo incentivo.

A todos os professores do Setor de Fruticultura, pelo constante apoio e incentivo durante o transcorrer do Curso.

Ao professor Tocio Sediya, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pelo apoio constante.

Aos professores das disciplinas cursadas durante a formação acadêmica, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, em especial, Carla Vidigal, Vicente Madaleno dos Santos e Mara Rodrigues, pela ajuda e apoio constantes.

Aos funcionários do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Domingos Sávio da Silva e Itamar, pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos Ramón Gil, Paula Torrealba, Márcio Cleber, José Salmito, Fransisco Javier, Mairón da Silva, Alexandre Ferreira, Raunira Araújo, Sarita Campos, Leopoldo, Magno e Diolino, pelo incentivo, pelo apoio e pela agradável convivência.

A minha esposa, Claudia A. Martínez, pelo grande estímulo, amor, e pela valiosa colaboração em todos os momentos da realização deste curso.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, participaram na minha formação acadêmica, o meu reconhecimento e gratidão.

BIOGRAFIA

WALTER ESFRAIN PEREIRA, filho de Taciana Melgarejo e Arístides Pereira, nasceu em Assunção, Paraguai, em 24 de setembro de 1969.

Em dezembro de 1992, graduou-se em Engenharia Agrônômica, pela Universidad Nacional de Asunción, Paraguai.

Concluiu o Curso de Mestrado em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, em setembro de 1996.

Em março de 1997, iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado em Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em março de 2001.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1	6
TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA EM QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO, EM CULTIVO HIDROPÔNICO	6
1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1. Obtenção de sementes.....	11
2.2. Cultivo e condução de mudas.....	11
2.3. Fatores em estudo e delineamento experimental	12
2.4. Características avaliadas	13
2.4.1. Trocas gasosas.....	13
2.4.2. Fluorescência da clorofila.....	13
2.4.3. Teor foliar de clorofila.....	14
2.5. Atividade e forma iônica do alumínio	14
2.6. Análise estatística	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1. Trocas gasosas.....	16
3.1.1. Taxa de fotossíntese líquida (A) e concentração interna de CO ₂ (C _i)	16

3.1.2. Condutância estomática ao vapor de água (g_s), e taxa transpiratória (E)	21
3.1.3. Eficiência fotossintética do uso da água (EFUA) e discriminação isotópica do carbono (Δ)	24
3.2. Fluorescência da clorofila	26
3.3. Teor de clorofila	30
3.4. Análise de componentes principais	33
4. CONCLUSÕES	36
CAPÍTULO 2	38
CRESCIMENTO DE QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO EM CULTIVO HIDROPÔNICO	38
1. INTRODUÇÃO	38
2. MATERIAL E MÉTODOS	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.1. Taxa relativa de crescimento	45
3.2. Crescimento do sistema radicular	48
3.3. Crescimento da parte aérea	51
3.4. Relação raiz parte aérea (RRPA)	54
3.5. Relação de área foliar (RAF) e de massa foliar (RMF)	56
3.6. Análise de componentes principais	59
4. CONCLUSÕES	61
CAPÍTULO 3	62
COMPOSIÇÃO MINERAL DE QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO, EM CULTIVO HIDROPÔNICO	62
1. INTRODUÇÃO	62
2. MATERIAL E MÉTODOS	66
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1 Macronutrientes	67
3.1.1. Nitrogênio	67
3.1.2. Fósforo	71
3.1.3. Potássio	73
3.1.4. Cálcio	76
3.1.5. Magnésio	78

	Página
3.1.6. Enxofre.....	81
3.2 Micronutrientes	83
3.2.1. Cobre	83
3.2.2. Ferro	85
3.2.3. Manganês	87
3.2.4. Zinco	89
3.3. Alumínio.....	91
4. CONCLUSÕES	95
5. DISCUSSÃO GERAL	97
CONCLUSÕES GERAIS	100
BIBLIOGRAFIA.....	103
APÊNDICE	120

RESUMO

PEREIRA, Walter Esfrain, D.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2001. **Trocas gasosas, fluorescência da clorofila, crescimento e composição mineral de quatro porta-enxertos de citros submetidos a estresse por alumínio, em cultivo hidropônico.** Orientador: Dalmo Lopes de Siqueira. Conselheiros: Mário Puiatti, Carlos Alberto Martínez y Huaman.

Este experimento teve como objetivo avaliar os efeitos de cinco concentrações de alumínio (0, 50, 100, 200 e 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al) sobre as trocas gasosas, a fluorescência da clorofila, o crescimento e a composição mineral dos porta-enxertos limoeiros 'Cravo' (*Citrus limonia* Osbeck) (CR) e 'Volkameriano' (*Citrus volkameriana* Hort. ex Tan.) (VL), e tangerineiras 'Cleópatra' (*Citrus reshni* Hort. ex Tan) (CL) e 'Sunki' (*Citrus sunki* Hort. ex Tan.) (SK), em cultivo hidropônico. O experimento foi montado segundo o esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas as concentrações de Al e nas subparcelas os porta-enxertos. Os tratamentos foram distribuídos no delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. A presença de 14, 18 e 55 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva, aumentou a taxa fotossintética líquida (A) nos porta-enxertos CR, SK e CL, respectivamente, verificando-se decréscimo com o aumento da concentração de Al. No VL houve efeito inibitório do Al sobre a A, mesmo em baixas concentrações. Com o aumento da concentração de Al, houve incremento da concentração interna de CO_2 em

todos os porta-enxertos. A condutância estomática ao vapor de água (g_s) e a taxa transpiratória (E) aumentaram na presença do Al nas duas tangerineiras. Todas as características relacionadas com a fluorescência da clorofila diminuíram em função da concentração de Al, com exceção da relação F_v/F_m na tangerineira CL. Em todos os porta-enxertos, a taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta aumentou na presença de baixas concentrações de Al (15 a 35 $\mu\text{mol L}^{-1}$) na solução nutritiva, decrescendo na presença de maiores concentrações. O crescimento da parte aérea, a relação de área foliar e a relação de massa foliar diminuíram em todos os porta-enxertos na presença do Al. No limoeiro 'Cravo' verificou-se decréscimo de crescimento do sistema radicular a partir de 23 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Nos demais porta-enxertos, esse crescimento atingiu valores máximos na presença de 91 a 117 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, verificou-se, na matéria seca do sistema radicular de todos os porta-enxertos, decréscimos dos teores de N-orgânico, P, Cu, Mn e Zn. Na matéria seca da parte aérea de todos os porta-enxertos, houve decréscimos dos teores de P e S em função da concentração de Al. Houve aumento do teor de Al no sistema radicular e na parte aérea de todos os porta-enxertos, em função da concentração de Al na solução nutritiva; esse acúmulo no sistema radicular foi de 11,4 a 30,6 vezes maior em comparação à parte aérea. Considerando-se as características das trocas gasosas, da fluorescência da clorofila e do crescimento de planta, o limoeiro 'Cravo' foi o mais sensível ao Al, enquanto que a tangerineira 'Cleópatra', foi o porta-enxerto mais tolerante.

ABSTRACT

PEREIRA, Walter Esfrain, D. S., Universidade Federal de Viçosa, March 2001. **Gas exchange, chlorophyll fluorescence, growth and mineral composition of four citrus rootstocks under aluminium stress, in hydroponic culture.** Adviser: Dalmo Lopes de Siqueira. Committee Members: Mário Puiatti and Carlos Alberto Martínez y Huaman.

The objective of this experiment was to evaluate the effects of five aluminium (Al) concentrations (0, 50, 100, 200, and 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$) on gas exchange, chlorophyll fluorescence, growth and mineral composition of the following lemon rootstocks: 'Cravo' (*Citrus limonia* Osbeck) (CR) and 'Volkameriano' (*Citrus Volkameriana* Hort. Ex Tan. (VL) and tangerine rootstocks 'Cleopatra' (*Citrus reshni* Hort. Ex Tan) (CL) and 'Sunki' (*Citrus sunki* Hort. Ex Tan.) (SK), in hydroponic culture. The experiment followed a split plot scheme with the plots being the Al concentrations and the subplots, the rootstocks, arranged in a randomized block design, with four replications. The presence of 14, 18 and 55 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Al in the nutritive solution increased the net photosynthesis (A) in the rootstocks CR, SK and CL, respectively, decreasing with increased Al concentration. Al inhibited A in the VL, even under low concentrations. Increased Al concentration increased internal CO_2 concentration, in all rootstocks. Stomatal conductance to water vapor (g_s) and transpiration rate (E) increased under Al, for both tangerine. All the characteristics related with chlorophyll fluorescence decreased as a function of

Al concentration, except the F_v/F_m relation in the tangerine CL. In all rootstocks, the relative growth rate of the plant's total fresh matter mass increased under low Al concentrations (15 to 35 $\mu\text{mol L}^{-1}$) in the nutritive solution, decreasing under larger concentrations. Growth of the shoot, leaf area ratio and leaf weight ratio decreased in all rootstocks in the presence of Al. The 'Cravo' lemon had a decrease in the root system growth, starting from 23 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Al. For the remaining rootstocks, this growth reached maximum values with 91 to 117 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Al. Increased Al concentration in the nutritive solution caused decrease in organic-N, P, Cu, Mn and Zn concentration in the root system's dry matter of all rootstocks. There was decrease of P and S concentration in the dry matter of the shoots of all rootstocks, as a function of Al concentration. Al concentration in the roots and shoot of all rootstocks increased as a function of Al concentration in the nutritive solution; this accumulation in the roots was 11.4 to 30.6 times higher than that in the shoots. Considering the characteristics of the gas exchange, chlorophyll fluorescence and plant growth, the lemon 'Cravo' was the most susceptible to Al, while the tangerine 'Cleopatra' was the most tolerant.

INTRODUÇÃO GERAL

Com a expansão da citricultura mundial, cuja área colhida aumentou de 6.217.302 ha, em 1993, para 7.460.661 ha em 2000 (FAO, 2000) e também da citricultura brasileira, na qual a área colhida de laranjas evoluiu de 800.505 ha, em 1993, para 1.009.001 ha em 1999 (FNP, 2000), novas áreas de plantio estão sendo exploradas. Nessas áreas, o solo pode apresentar condições desfavoráveis para o crescimento das plantas cítricas, sendo um dos principais problemas a toxicidade do alumínio (Al), fator limitante em muitos solos ácidos, cuja extensão estima-se entre 40% a 70% dos solos aráveis do mundo (RENGEL, 1992).

No Estado de São Paulo, aproximadamente 70% dos solos onde a citricultura está implantada apresenta restrições ao crescimento radicular devido ao Al. Em outras regiões do Brasil observa-se, com freqüência, pomares implantados em solos originalmente cobertos por vegetação de cerrado, que apresentam baixa fertilidade, elevada acidez e teor elevado de Al (DEMATTE e VITI, 1992).

O Al é considerado o principal elemento tóxico nos solos ácidos. Em soluções ácidas a forma iônica predominante do Al é o cátion trivalente Al^{3+} , circundado por moléculas de água $[Al(H_2O)_6]^{3+}$; quando o pH se eleva ocorrem sucessivas desprotonações, formando-se o $Al(OH)^{2+}$ e o $Al(OH)_2^+$ (KOCHIAN, 1995). A fração molar de íons livres de Al, em relação ao total de Al, varia de

$<10^{-6}$, em pH 7, a 1 em pH 4 (MacDONALD e MARTIN, 1988). Desta forma, alterações mínimas do pH podem afetar significativamente a atividade do Al^{3+} .

Dependendo da espécie cultivada, a toxicidade causada pelo Al pode ocorrer em solos com pH abaixo de 5,5 (FAGERIA e ZIMMERMANN, 1979). Esse problema é particularmente sério em subsolos fortemente ácidos, de difícil correção, agravada pela adição de fertilizantes nitrogenados com potencialidade de diminuir o pH da solução do solo (FOY, 1988).

Os solos que podem apresentar alta saturação por Al são os classificados como Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Escuro (RESENDE et al., 1995).

A maior parte do sistema radicular dos citros encontra-se nas camadas superficiais do solo, sendo que em laranjeiras adultas, aproximadamente 90% das raízes esta situada até a profundidade de 60 cm. O crescimento e a produtividade dos citros, são adversamente afetados pela acidez do solo (MALAVOLTA e NETTO, 1989)

Os citros apresentam sistema radicular mais denso e mais profundo e maior produtividade quando plantados em solos eutróficos, em comparação aos plantados em solos com elevada saturação de Al (OLIVEIRA, 1991).

ANDERSON (1987) verificou aumento na produtividade da laranjeira 'Valência' cultivada em solo ácido com pH em torno de 5, passando de 46 kg de frutos $árvore^{-1} ano^{-1}$, para 61 kg $árvore^{-1} ano^{-1}$ nas plantas cultivadas em solo corrigido com calcário, com pH em torno de 7. No Estado de Paraná, FIDALSKI et al. (1999) verificaram correlação negativa entre a produtividade de frutos da laranjeira 'Pêra' e o teor de Al no solo, assim como com a acidez total do solo.

A toxicidade do Al nem sempre pode ser economicamente corrigida com a prática da calagem convencional ou outras práticas de manejo do solo (FOY, 1988). Em vários países, um dos principais motivos é que muitas áreas com problemas de acidez do solo se encontram muito distantes dos locais de produção do calcário agrícola (Myers e Depauw, citado por GINTING et al., 1998). Outra dificuldade é a correção de camadas ácidas que ocorrem a maior profundidade do solo, cuja acidez aumenta devido a utilização de adubos nitrogenados, como o sulfato de amônio (MASON, 1980).

As plantas apresentam diferentes graus de adaptação ao Al. Variabilidade de adaptação ao Al pode ser observada entre plantas de um mesmo gênero ou entre variedades de uma mesma espécie (NUNES et al. 1995, SIMON et al. 1994a, MASSOT et al., 1999), e a exploração dessa característica pode ser uma opção viável para a utilização dos solos ácidos.

Em relação aos porta-enxertos utilizados na citricultura, LIN e MYHRE (1991a) concluíram, baseados na produção de massa da matéria fresca total da planta, que os porta-enxertos de citros, por eles avaliados, poderiam ser classificados, em relação à tolerância ao Al, da seguinte forma: tangerineira 'Cleópatra' > limoeiro 'Rugoso' > *Citrus aurantium* > Citrumeleiro 'Swingle' > citrange 'Carrizo'.

Os porta-enxertos influenciam na variedade-copa, alterando diversas características, como: precocidade ou retardamento do início da produção, tamanho da planta, produtividade e qualidade dos frutos, época de maturação e permanência dos frutos na planta, conservação pós-colheita, tolerância a baixa fertilidade, a salinidade e a acidez do solo (WUTSCHER, 1979). Conseqüentemente, durante o planejamento do pomar cítrico, deve ser escolhido o porta-enxerto que apresente maior adaptação às condições edafoclimáticas predominantes no local, além de conferir qualidade adequada aos frutos.

O uso generalizado do limoeiro 'Cravo' nas mais diversas copas e tipos de solo e de clima não atende adequadamente às necessidades de todas as variedades, impedindo que a planta manifeste todo o seu potencial produtivo (POMPEU JUNIOR, 1991).

Portanto, torna-se evidente a necessidade de diversificação dos porta-enxertos utilizados na citricultura brasileira, diminuindo os riscos de eventual aparecimento de doenças ou de pragas, além de permitir a exploração econômica de áreas que se encontrem nas mais variadas condições edafoclimáticas. Para atingir esses objetivos, é preciso avaliar o grau de tolerância de determinado porta-enxerto, em relação a determinado fator estressante, baseado na avaliação de características fisiológicas, de crescimento e de composição mineral.

A avaliação da tolerância ao Al pelas plantas pode ser feita no campo ou em cultivo hidropônico, sendo este último o mais recomendado. De acordo com FAGERIA e ZIMMERMAN (1979), a seleção de variedades de arroz tolerantes ao Al realizada em campo, em solos ácidos, apresenta como desvantagens, em relação à utilização de hidroponia, maior emprego de mão-de-obra, maior demora e, freqüentemente, é mascarada pela variabilidade do solo e pela diferença de resistência das variedades às doenças e aos insetos. Além disso, a inibição do crescimento radicular, sintoma característico de toxicidade do Al, é difícil de ser avaliada nessas condições.

As principais vantagens da utilização da hidroponia em comparação ao solo, são a maior facilidade de condução e de manipulação das plantas para avaliação do sistema radicular. Além disso, utiliza pouco espaço e possibilita a realização de experimentos em qualquer época do ano (FURLANI e HANNA, 1984).

Em muitas situações, tem sido verificado efeito semelhante do Al sobre as plantas cultivadas em hidroponia ou no solo. Por exemplo, BALIGAR et al. (1995) verificaram que os efeitos do Al sobre as características do crescimento e da absorção de nutrientes foram semelhantes em três variedades de trigo cultivadas no solo ou em solução nutritiva. BAIER et al. (1995) também verificaram que os valores de comprimento radicular e de índice de tolerância radicular obtidos em plantas de trigo sob estresse por Al em hidroponia tiveram correlação significativa ($r=0,71$ a $0,85$) com os valores obtidos em plantas submetidas a estresse por Al no solo. Porém, genótipos classificados como tolerantes em ensaio de campo podem apresentar-se como sensíveis em hidroponia, e vice-versa (DEVINE et al., 1976).

O emprego de solução nutritiva completa para estudar a toxicidade de Al enfrenta alguns problemas, pois o Al é precipitado por PO_4^{-3} , removido por quelatos de Fe ou precipitado quando o pH é elevado pelas raízes. Assim, os testes de toxicidade de Al em cultivos hidropônicos devem ser realizados utilizando soluções nutritivas modificadas em relação a sua composição, com o objetivo de diminuir a sua força iônica (SHUMAN e WILSON, 1994).

A toxicidade do Al está estreitamente relacionada com a força iônica da solução nutritiva, juntamente com sua atividade. Com a diminuição da força

iônica da solução nutritiva, aumenta a atividade do Al; portanto muda o nível crítico de toxicidade (PAVAN e BINGHAM, 1982).

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos do alumínio sobre quatro porta-enxertos de citros, considerando características das trocas gasosas, da fluorescência da clorofila, do crescimento da planta e da composição mineral do sistema radicular e da parte aérea.

CAPÍTULO 1

TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA EM QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO, EM CULTIVO HIDROPÔNICO

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos do alumínio (Al) sobre o crescimento das plantas pode ser resultado da diminuição da taxa fotossintética (A), que por sua vez está relacionada com outras características das plantas, tais como a condutância estomática (g_s), que é um dos principais fatores que regula o fluxo de CO_2 e a transpiração pelas folhas (KOZLOWSKI e PALLARDY, 1997). O Al pode afetar vários processos relacionados com a fotossíntese. Em plantas de trigo, diminui a taxa fotossintética e a transpiração, enquanto que em plantas de sorgo diminui a taxa fotossintética e aumenta a transpiração (OHKI, 1986).

O estresse de Al também diminui a eficiência fotoquímica do fotossistema II (MOUSTAKAS et al. 1993, MOUSTAKAS e OUZOUNIDOU, 1994); diminui a concentração de ATP nas folhas (LOREN-PLUCINSKA e ZIEGLER, 1996); provoca danos à membrana externa do cloroplasto (HAMPP e SCHNABL, 1975) e provoca mudanças na forma do cloroplasto e no arranjo dos grana (MOUSTAKAS et al., 1997).

A diminuição da concentração de ATP provocada pelo Al em pH alcalino, pode ser devido à ligação e à substituição do fosfato terminal do ATP

pelo seu homólogo estrutural $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Em pH ácido, existiria maior afinidade do Al^{+3} que o Mg^{+2} pelo ATP. Desta forma, o efeito do Al sobre a fotossíntese poderia ser devido à menor disponibilidade de ATP (HUSAINI e RAI, 1992).

A perda de elementos essenciais (Ca, Mg e K) do cloroplasto, induzida pelo Al, e o concomitante aumento do gradiente de prótons através da membrana do tilacóide é um mecanismo sugerido por MOUSTAKAS e OUZOUNIDOU (1994), como efeitos indiretos do Al^{+3} sobre o processo fotossintético.

O aumento da inibição da evolução de O_2 , do transporte de elétrons, e da absorção de ^{14}C em *Nostoc linckia*, com o aumento da acidez da solução, são indicativos de que a forma mais tóxica seja o Al^{+3} . A inibição do fotossistema I e da capacidade redox dos dois fotossistemas pode ser devida à substituição do Fe pelo Al nos centros Fe-S (HUSAINI e RAI, 1992).

A discriminação isotópica do carbono (Δ) devida ao fracionamento dos isótopos estáveis do carbono (^{12}C e ^{13}C) no processo de fixação do CO_2 , é influenciada por muitos fatores ambientais e oferece uma medida integrada durante todo o ciclo da planta da eficiência do uso da água (EFUA), (KOZLOWSKI e PALLARDY, 1997). Embora seja necessária a utilização de espectrofotômetro de massa para a determinação de Δ , resultados aproximados em plantas C_3 podem ser obtidos de acordo com o procedimento desenvolvido por FARQUHAR et al. (1982) e FARQUHAR et al. (1989), baseado na concentração interna (C_i) e atmosférica de CO_2 (C_a). De forma geral, os valores obtidos com esses dois procedimentos apresentam correlação positiva elevada (FARQUHAR et al. 1989; BRUGNOLI e LAUTERI, 1991).

O Al tem sido relacionado com os problemas provocados pela acidificação dos solos em várias espécies florestais do hemisfério norte. Assim, em *Picea abies*, a relação entre os teores foliares de alumínio e de cálcio (Al/Ca) esteve relacionada com variações da fotossíntese e da respiração, comparando sítios que apresentavam diferentes níveis de poluição (MCLAUGHLIN et al., 1990). Em solos poluídos, com elevados teores de Al^{+3} e valores elevados de Al/Ca, a taxa fotossintética de *Pinus silvestris* diminuiu 37% em relação aos sítios não poluídos, verificando-se maior correlação com Al/Ca, $r=-0,93$, que com o teor de Al^{+3} , $r=-0,60$, (REICH et al., 1994). Em folhas

de *Pinus*, a fixação do carbono é mais sensível ao alumínio que o transporte de elétrons (LOREN-PLUCINSKA e ZIEGLER, 1996).

O teor de Al na solução do solo é o principal fator que limita a fotossíntese, a produção de matéria seca e o acúmulo de nutrientes das espécies florestais do Japão que crescem em solos ácidos (IZUTA, 1998). Em mudas de *Pinus* crescidas em solos ácidos, com teores elevados de Al^{+3} , verificou-se decréscimo do rendimento quântico e da eficiência de carboxilação da fotossíntese, possivelmente devido à diminuição das reações fotoquímicas da fotossíntese e da atividade ou do teor da Rubisco (LEE, 1998).

Excesso de alumínio na solução nutritiva onde foram colocadas mudas de *Fagus sylvatica*, resultou em diminuição da taxa fotossintética e do teor de clorofila (RIDOLFI e GARREC, 2000).

Efeitos semelhantes do alumínio sobre os processos fotossintéticos são verificados também em plantas herbáceas. Plantas de trigo crescidas em solos ácidos tiveram decréscimo das taxas fotossintética e transpiratória e do teor de clorofila, quando comparadas às plantas crescidas em solos onde foram aplicados corretivos (ZAIENEJAD et al., 1996).

As condições de estresse, assim como os danos induzidos pelo estresse nas plantas, podem ser detectados usando o método ecofisiológico clássico de determinar a taxa fotossintética, a taxa transpiratória, a condutância estomática e o teor dos pigmentos fotossintéticos. Sob condições normais, aproximadamente 80 a 90% da energia luminosa absorvida pelas folhas é consumida na conversão fotossintética, 5 a 15% é dissipada na forma de calor e de 0,5 a 2% na forma de fluorescência da clorofila. Em condições de estresse, a conversão fotossintética diminui, com aumento da dissipação na forma de calor e de fluorescência da clorofila (LICHTENTHALER, 1996). À temperatura ambiente, a maioria da fluorescência é emitida pela clorofila a do fotossistema II (KRAUSE e WEIS, 1991).

Em condições estressantes para as plantas, a fluorescência da clorofila é aumentada, assim como ocorrem também mudanças nas características relacionadas com a fluorescência, como a fluorescência inicial (F_0), a fluorescência máxima (F_m), a fluorescência variável (F_v), e a razão entre as mesmas (LICHTENTHALER e RINDERLE, 1988). Os efeitos estressantes de

fatores como temperatura, salinidade, radiação, seca e outros, têm sido pesquisados por meio de medições de fluorescência da clorofila (HAVAUX e LANNOYE, 1985).

Em relação ao Al, essa técnica foi empregada com sucesso para a detecção precoce dos efeitos desse elemento sobre os processos fotossintéticos (MOUSTAKAS e OUZOUNIDOU, 1994; TALEB et al. 1995; MOUSTAKAS et al. 1997), apresentando as seguintes vantagens: **1)** as medições são feitas diretamente em tecidos intactos da planta, **2)** o método não é destrutivo, permitindo realizar várias medições ao longo de um experimento, **3)** cada medição demora somente alguns segundos, **4)** os dados obtidos podem ser processados diretamente com um computador ou armazenados para análise posterior e, **5)** há disponibilidade de fluorômetros portáteis de fácil operação (MOUSTAKAS et al., 1993).

Os carotenóides e a clorofila absorvem a energia radiante que é utilizada para a fotossíntese, sendo parte desta energia emitida como fluorescência da clorofila (PAPAGEORGIOU, 1975). Assim sendo, estudo *in vivo* dessa fluorescência fornece informações básicas sobre o funcionamento do aparato fotossintético, existindo relação inversa entre a atividade fotossintética e a fluorescência *in vivo* da clorofila (KRAUSE e WEIS, 1991).

A membrana do tilacóide do cloroplasto contém uma maquinaria complexa responsável pela conversão fotossintética da energia luminosa em energia química. Esta conversão requer participação coordenada de vários processos, como a captura da luz, a separação de cargas, o transporte de elétrons, a translocação de prótons e a catálise enzimática. A fluorescência da clorofila emitida pela membrana do tilacóide do cloroplasto reflete os processos primários da fotossíntese (MOUSTAKAS et al., 1997).

Muitos métodos têm sido desenvolvidos para determinar a tolerância relativa ao Al de espécies e de variedades de plantas. Alguns deles estão baseados no crescimento da parte aérea e do sistema radicular (FRÁGUAS et al., 1989; BORKOWSKA, 1991; FRÁGUAS, 1999), na composição mineral (BERNAL e CLARK, 1997; FRÁGUAS, 1999), na síntese de ácidos orgânicos (JIAN et al, 1998; FENG et al., 1998), na síntese de calose (HORST et al., 1997; MASSOT et al., 1999) e na coloração de radículas, seja com

hematoxilina (POLLE et al., 1978) ou com eriocromo cianina (FENG et al., 1997).

A maioria desses métodos não apresenta suficiente simplicidade e eficiência. Porém, a principal desvantagem deles é o tempo necessário para as determinações das características de interesse (MOUSTAKAS et al., 1993).

A fluorescência da clorofila, juntamente com medições das trocas gasosas, foram utilizadas com sucesso como método de seleção de vinte variedades de *Hordeum vulgare* para tolerância à seca (NOGUES et al., 1994).

Na literatura científica não foram encontradas pesquisas sobre a avaliação dos efeitos do alumínio sobre as trocas gasosas de plantas cítricas, assim como sobre a possibilidade de utilização da fluorescência da clorofila como critério de avaliação do grau de tolerância ao alumínio de diferentes espécies do gênero *Citrus*.

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos do Al sobre as características das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila em quatro porta-enxertos cítricos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi conduzida em casa de vegetação localizada no Setor de Fruticultura da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no período de fevereiro a abril de 1998.

2.1. Obtenção de sementes

Frutos maduros foram colhidos de plantas de porta-enxertos localizadas no pomar da UFV. Após retiradas dos frutos, as sementes foram lavadas, selecionadas, desmuciladas e enxaguadas em água corrente e colocadas para secar à sombra durante uma semana. Após a secagem, foi realizado um tratamento a seco com o fungicida Captan® 500 na dose de 1 g do produto comercial em cada 100 g de sementes. Posteriormente, as sementes foram armazenadas durante um mês, em câmara fria a 5°C, quando procedeu-se a semeadura.

2.2. Cultivo e condução de mudas

As sementes foram colocadas para germinar em caixas plásticas, contendo vermiculita como substrato, e irrigadas, quando necessário, com solução de Hoagland com $\frac{1}{4}$ da concentração original de seus sais. As mudas, com altura média de 7,7 cm, foram selecionadas de acordo com o tamanho e

transferidas para caixas de isopor de 12 L de capacidade, contendo solução nutritiva de Hoagland modificada de acordo com SIMON et al. (1994a), constituída dos seguintes sais: 500 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de KNO_3 ; 500 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 200 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 100 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de KH_2PO_4 ; 50 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de KCl ; 46 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de H_3BO_3 ; 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Fe-EDTA ; 2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e 0,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Após sete dias, o Al foi adicionado à solução na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

A solução foi arejada mediante o emprego de um compressor de ar. O pH da solução nutritiva foi monitorado diariamente e mantido a valor quatro (4,0) mediante a adição de HCl (0,1 mol L^{-1}) ou de NaOH (0,1 mol L^{-1}). Inicialmente, a troca das soluções foi realizada a cada duas semanas, posteriormente, durante o último mês, essa troca foi semanal. Cada caixa continha duas mudas de cada porta-enxerto, totalizando oito mudas.

As plantas foram conduzidas durante 70 dias, sob condições de fotoperíodo natural e temperatura ambiente mínima de 21°C, máxima de 35°C e média de 28°C.

2.3. Fatores em estudo e delineamento experimental

Os fatores em estudo foram cinco concentrações de Al na solução nutritiva (0, 50, 100, 200, e 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$) e quatro porta-enxertos de citros: limoeiros 'Cravo' (*Citrus limonia* Osbeck) e 'Volkameriano' (*Citrus volkameriana* Hort. ex Tan.), e tangerineiras 'Cleópatra' (*Citrus reshni* Hort. ex Tan) e 'Sunki' (*Citrus sunki* Hort. ex Tan.).

O experimento foi montado segundo o esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas as concentrações de Al e nas subparcelas os porta-enxertos. Os tratamentos foram distribuídos no delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Cada unidade experimental constou de duas plantas.

2.4. Características avaliadas

2.4.1. Trocas gasosas

No final do período de 70 dias foram determinadas a taxa de fotossíntese líquida (A), a concentração interna de CO₂ (C_i), a condutância estomática ao vapor de água (g_s) e a taxa transpiratória (E). A eficiência fotossintética do uso da água (EFUA) foi estimada mediante a seguinte fórmula: EFUA = A/E.

A discriminação isotópica do carbono (Δ) foi estimada de acordo com a seguinte fórmula, válida para plantas C₃, (FARQUHAR et al., 1989):

$$V = a + (b - a) \frac{C_i}{C_a}, \text{ onde,}$$

V = discriminação isotópica do carbono

a = fracionamento devido à difusão do CO₂ no ar (4,4‰)

b = fracionamento devido à carboxilação do CO₂ (27‰)

C_i = concentração interna de CO₂

C_a = concentração de CO₂ na atmosfera.

As medições foram feitas entre 09:00 e 13:00 horas, em plantas intactas com o emprego do analisador portátil de dióxido de carbono no infravermelho, modelo LCA-2 (ANALYTICAL DEVELOPMENT Co. Ltd., England). Como fonte de radiação fotossinteticamente ativa (850-900 μmol m⁻² s⁻¹) foram utilizadas duas lâmpadas de tungstênio-halogênio de 1.000 W. Durante as medições, a temperatura das folhas variou de 25°C a 28°C. As medições das trocas gasosas foram realizadas na Unidade de Crescimento de Plantas, pertencente ao Departamento de Biologia Vegetal.

2.4.2. Fluorescência da clorofila

As determinações da cinética de emissão de fluorescência da clorofila a foram realizadas com a utilização de um fluorômetro portátil (Plant Efficiency Analyser, PEA, HANSATECH INSTRUMENTS Ltd., England). As folhas utilizadas para as medições foram pré-acondicionadas no escuro por 30

minutos, sendo iluminadas durante 5 s para induzir a fluorescência. Foram determinadas a fluorescência inicial (F_0), a fluorescência máxima (F_m), e a área acima da curva de fluorescência (AAC). Foram calculadas a fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$), a relação F_v / F_m e a relação F_v / F_0 . Esta relação, tem amplitude muito maior que a relação F_v / F_m , e de acordo com LICHTENTHALER et al. (1992) e DA MATTA et al. (1997), reflete mais sensivelmente as mudanças do processo fotossintético.

2.4.3. Teor foliar de clorofila

Para a determinação do teor de clorofila foi retirada a terceira ou quarta folha a partir do ápice da planta. Destas folhas foram retiradas discos de limbo foliar, evitando-se as nervuras. Posteriormente, foi determinada a massa de matéria fresca desses discos, que foram levados para local escuro e macerados, em almofariz, com areia lavada, carbonato de cálcio e acetona 80%, para extração da clorofila. Após a maceração, filtrou-se o material em papel filtro, completando o volume dos balões volumétricos com acetona 80% para 25 mL. Posteriormente, foi feita a leitura em espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 663 e de 645 nm. O cálculo da concentração das diferentes formas de clorofila foi realizado conforme ARNON (1949).

2.5. Atividade e forma iônica do alumínio

A atividade e a forma iônica do alumínio na solução nutritiva foram estimadas com o software MINTQA2 (ALLISON et al., 1991). Desta forma, a atividade correspondente às concentrações aplicadas de Al foi de 0, 15, 29, 57 e 112 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} , respectivamente. Esta forma iônica do Al, considerada a mais tóxica para as plantas (KINRAIDE, 1997; SANZONOWICZ et al. 1998), constituiu de 72% a 74% do total de Al adicionado à solução nutritiva.

2.6. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância. Os efeitos das concentrações de Al sobre as características avaliadas foram estudados por meio de análise de regressão até 10% de probabilidade pelo teste F. Os porta-enxertos foram comparados entre si por contrastes ortogonais (Quadro 1) dos valores percentuais em relação à ausência de Al, a qual foi considerada com valor de 100%. As análises foram realizadas mediante o procedimento MIXED do SAS (LITTEL et al., 1996; SAS INSTITUTE, 1999).

Devido à elevada correlação existente entre as variáveis determinadas e, com o objetivo de facilitar a classificação dos porta-enxertos com respeito à tolerância ao alumínio, os valores percentuais, em relação à ausência de alumínio, foram submetidos a análises de componentes principais (CRUZ e REGAZZI, 1994; JOHNSON e WICHERN, 1998; SAS INSTITUTE, 1999). O agrupamento dos porta-enxertos foi baseado no método de Tocher, aplicado nos escores dos componentes principais. Algumas aplicações dos componentes principais na agricultura foram apresentadas por IEZZONI e PRITTS (1991), CARADUS et al. (1993) e STEWART et al. (1998).

Quadro 1 – Coeficientes dos contrastes ortogonais utilizados para comparar os porta-enxertos, limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL)

Contrastes	Porta-enxertos			
	CR	SK	VL	CL
CR vs VL	1	0	-1	0
SK vs CL	0	1	0	-1
LIM. vs TAN.	1	-1	1	-1

LIM = limoeiros; TAN = tangerineiras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

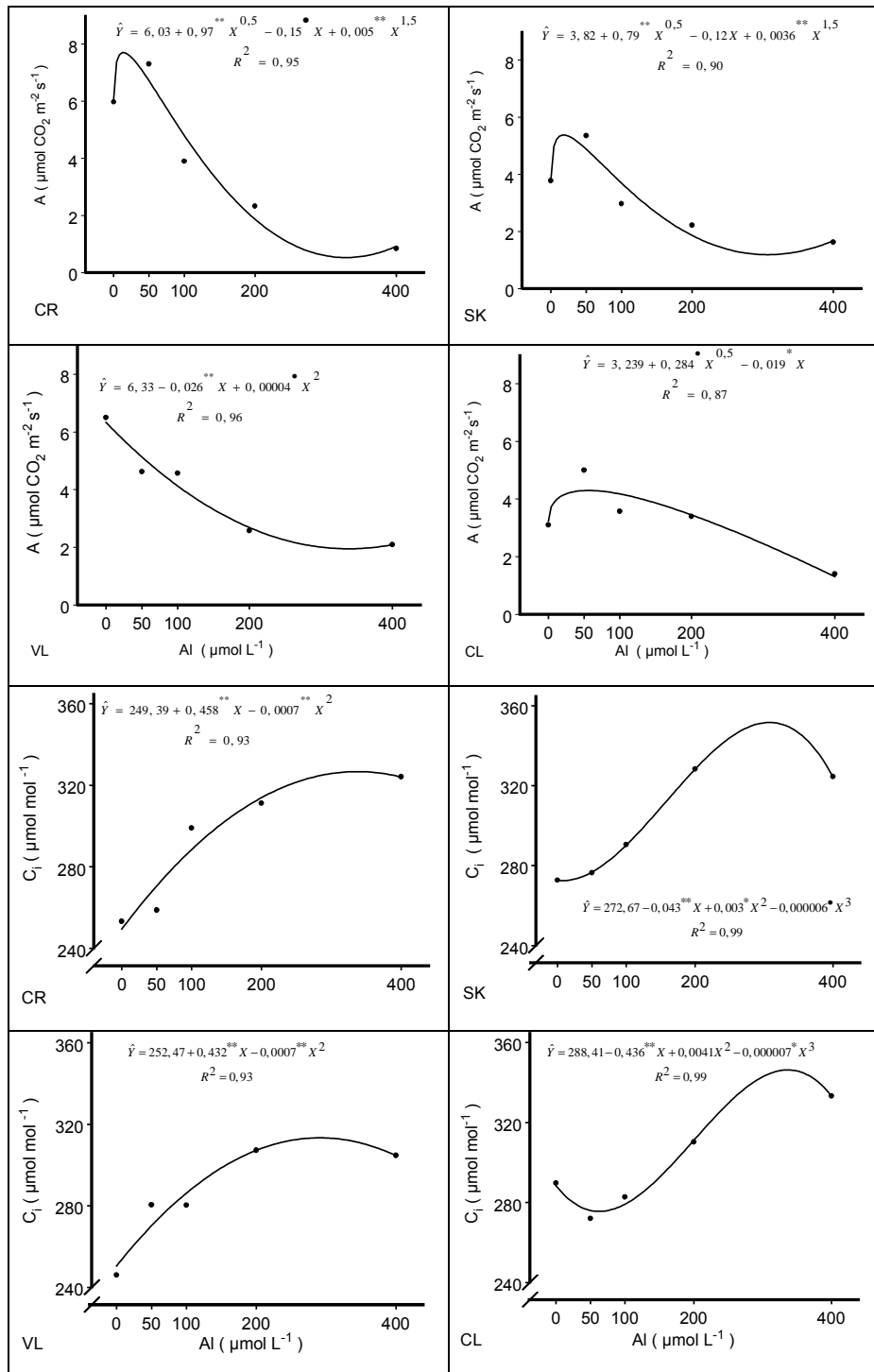
3.1. Trocas gasosas

3.1.1. Taxa de fotossíntese líquida (A) e concentração interna de CO₂ (C_i)

Nos porta-enxertos 'Cravo' (CR), 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), a presença de Al em baixas concentrações na solução nutritiva estimulou a taxa fotossintética líquida (A), sendo os valores estimados máximos obtidos com 14, 18 e 55 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente (Figura 1). A partir desses valores, com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva ocorreu diminuição da A nesses porta-enxertos. No limoeiro 'Volkameriano' (VL), o Al, mesmo em baixas concentrações, provocou diminuição da A.

Na ausência de alumínio, os limoeiros apresentaram maiores valores absolutos da A em comparação com as tangerineiras. Porém, em valores relativos, os maiores aumentos iniciais da A foram verificados nas tangerineiras, principalmente na CL (Figura 1).

Considerando a média dos valores relativos da A, em relação à testemunha, verifica-se que os limoeiros CR e VL apresentaram maior inibição em relação às duas tangerineiras. Destas, a CL foi o porta-enxerto menos afetado pelo alumínio (Quadros 1 e 2).



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 1 – Estimativa da taxa de fotossíntese líquida (A) e da concentração interna de CO_2 (C_i) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Quadro 1 – Média (%) dos valores, em relação à testemunha, nas cinco doses de alumínio, de características avaliadas nos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e nas tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Características	Porta-enxertos			
	CR	SK	VL	CL
Taxa de fotossíntese líquida	68,1	84,5	62,7	106,3
Concentração interna de CO ₂	114,2	109,4	115,3	102,7
Condutância estomática	132,7	222,6	103,8	201,6
Taxa transpiratória	134,6	170,7	110,9	171,1
Eficiência fotossintética do uso da água	58,1	64,4	58,0	84,7
Discriminação isotópica de carbono	107,9	106,2	107,7	102,1
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (F _v /F ₀)	74,6	90,4	80,5	92,9
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (F _v /F _m)	90,0	97,1	92,8	98,2
Área acima da curva de fluorescência	63,0	85,5	72,9	85,9
Teor de clorofila a	75,9	102,3	61,9	81,0
Teor de clorofila b	87,2	111,7	64,2	75,7
Teor de clorofila total	80,3	106,4	62,9	78,4

Os valores da A, medidos nos porta-enxertos na ausência de Al, estão em conformidade com os valores de 4 a 8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ reportados por SYVERTSEN (1984), BAÑULS e PRIMO-MILLO (1992, 1995), BAÑULS et al. (1997) e WALKER et al. (1993), sob condições ambientais normais. De acordo com KRIEDEMANN (1971), as plantas de *Citrus* sp. têm taxa fotossintética baixa em comparação a outras fruteiras, como macieira, pessegueiro e videira. Essa reduzida taxa fotossintética está relacionada com elevada resistência à difusão do CO₂ dos estômatos aos sítios de carboxilação (LLOYD et al., 1992; SYVERTSEN et al., 1997).

Aumento de 22%, 42% e 61% da A foram observados na presença de 50 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al nos porta-enxertos CR, SK e CL, respectivamente (Figura 1). LIDON et al. (1997) também verificaram em plantas de milho, aumento de 62% da A na presença de 1 mmol L^{-1} de Al quando comparado com o controle. Possíveis explicações para esse efeito benéfico do Al sobre a taxa de fotossíntese líquida é que em soluções ácidas (pH em torno de 4,0), a presença de Al em baixas concentrações compete com o H⁺ por sítios de

Quadro 2 – Estimativa do contraste dos valores (%) em relação à testemunha, nas cinco doses de alumínio, de características avaliadas nos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e nas tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Características	Contrastes		
	CR vs VL	SK vs CL	LIM. vs TAN.
Taxa de fotossíntese líquida	5,4	-21,8 *	-30,0 **
Concentração interna de CO ₂	-1,1	6,7 **	8,7 **
Condutância estomática	29,0	21,0	-93,8 **
Taxa transpiratória	23,7	-0,4	-48,2 **
Eficiência fotossintética do uso da água	0,2	-20,3 **	-16,5 **
Discriminação isotópica de carbono	0,2	4,2 **	3,6 **
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (F _v /F ₀)	-5,8	-2,5	-14,1 **
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (F _v /F _m)	-2,8	-1,1	-6,3 **
Área acima da curva de fluorescência	-9,8	-0,3	-17,7 **
Teor de clorofila <i>a</i>	14,0	21,3 **	-22,8 **
Teor de clorofila <i>b</i>	23,0 *	36,0 **	-18,0 *
Teor de clorofila total	17,4	28,0 **	-20,8 **

Lim. = Limoeiros ; Tan. = Tangerineiras.

*, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

absorção na superfície celular (KINRAIDE e PARKER, 1987); diminui a extrusão de nutrientes (HORST et al., 1992) e estimula o efluxo do H⁺, essencial para o crescimento do sistema radicular em pH ácido (YAN et al., 1992). Como resultado, ocorre maior crescimento do sistema radicular e absorção de maiores quantidades de nutrientes, estimulando conseqüentemente o processo fotossintético.

A diminuição da taxa de fotossíntese líquida, a partir de determinada concentração de Al na solução nutritiva, foi observada por MOUSTAKAS et al. (1996), que verificaram em *Thynopyrum bessarabicum*, 26% de diminuição na presença de 1 mmol L⁻¹ de Al em relação ao controle. Em duas cultivares de *Triticosecale* também foi verificada diminuição de até 53% da A na presença de 550 µmol L⁻¹ de Al (NUNES et al., 1995). Desta forma, verifica-se que a taxa fotossintética é uma característica das plantas que apresenta grau variável de adaptação ao Al.

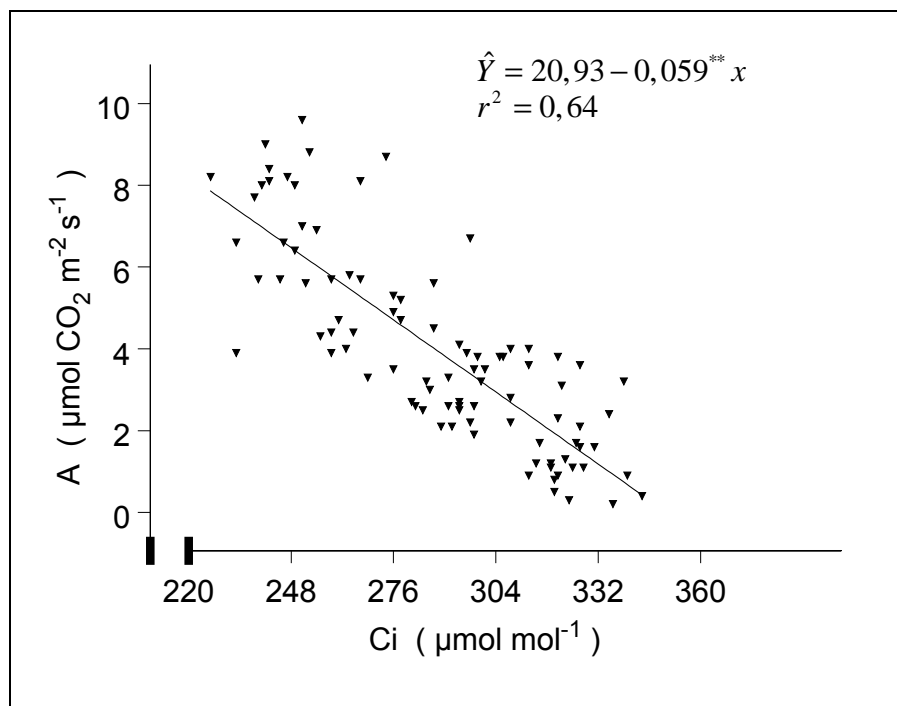
Em todos os porta-enxertos avaliados, exceto na CL, a concentração interna de CO₂ (C_i) aumentou significativamente com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, obtendo-se valores máximos estimados com 337, 308, e 291 μmol L⁻¹ de Al, nos porta-enxertos CR, SK e VL, respectivamente (Figura 1). Na CL, houve diminuição inicial da C_i, aumentando a partir da dose estimada de 60 μmol L⁻¹ de Al, atingindo valor máximo com 337 μmol L⁻¹ de Al.

Na ausência de alumínio, as tangerineiras apresentaram maiores valores absolutos da C_i em comparação com os limoeiros (Figura 1). Considerando a média dos valores relativos da C_i, em relação à testemunha, verifica-se que a tangerineira SK apresentou maior aumento em comparação à CL e que os limoeiros apresentaram maior aumento em relação às duas tangerineiras (Quadros 1 e 2).

A resposta da C_i ao Al varia de acordo com a espécie e as condições experimentais. Os resultados obtidos neste experimento concordam com os obtidos por SIMON et al. (1994b) e LIDON et al. (1997), que verificaram até determinada concentração de Al, aumento da C_i em plantas de tomateiro e de milho, respectivamente. Por outro lado, MOUSTAKAS et al. (1996) verificaram em *Thynopyrum bessarabicum* diminuição de 10% da C_i na presença de 1 mol L⁻¹ de Al.

Analisando a correlação existente entre a taxa de fotossíntese líquida e a C_i dos quatro porta-enxertos avaliados, pode ser verificado que houve correlação negativa entre as duas características citadas (Figura 2), indicando que o decréscimo da A não foi devido a restrições estomáticas ao intercâmbio gasoso da planta.

Em plantas submetidas a estresse, a diminuição da taxa fotossintética sem a correspondente diminuição da concentração interna de CO₂ é considerada, na maioria dos casos, indicativo da existência de restrições não estomáticas sobre a taxa de fotossíntese líquida. BRUGNOLI e LAUTERI (1991) verificaram em algodoeiro que a salinidade diminuiu a A e a C_i, indicando que um dos motivos da diminuição da A foi o fechamento dos estômatos. Em feijoeiro, verificaram que a salinidade diminuiu a taxa de fotossíntese líquida e aumentou a C_i, de forma semelhante aos resultados obtidos neste experimento.



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste "t".

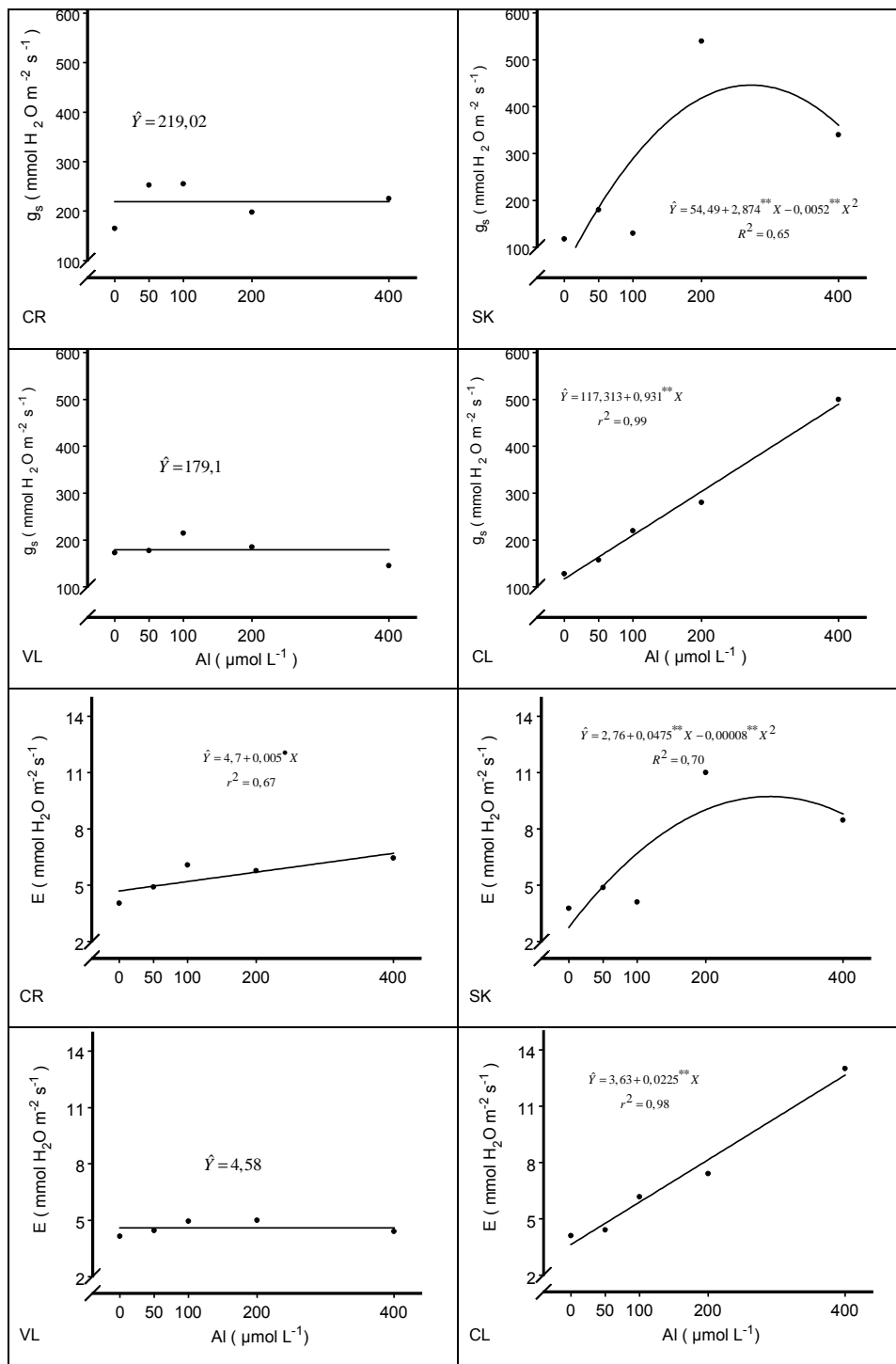
Figura 2 – Diagrama de dispersão entre a taxa de fotossíntese líquida (A) e a concentração interna de CO₂ (C_i) em quatro porta-enxertos de citros submetidos a estresse por alumínio.

Por outro lado, SIMON et al. (1994b) verificaram em tomateiros submetidos a estresse por alumínio, que a diminuição da condutância estomática, devido ao fechamento dos estômatos, resultou em menores valores da C_i, o qual foi considerado como responsável parcial pela diminuição da taxa de fotossíntese líquida.

3.1.2. Condutância estomática ao vapor de água (g_s), e taxa transpiratória (E)

Não foi verificado efeito significativo do Al sobre a condutância estomática ao vapor de água (g_s) nos limoeiros (Figura 3). Nas tangerineiras, o Al aumentou significativamente a g_s, sendo no caso da SK o valor máximo estimado (446 mmol H₂O m⁻² s⁻¹) atingido com 293 μmol L⁻¹ de Al; já na CL o aumento ocorreu até a maior concentração avaliada de Al.

As tangerineiras apresentaram maiores valores absolutos da g_s em comparação com os limoeiros (Figura 3). Considerando a média dos valores



•, ** = Significativo a 10, e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 3 – Estimativa da condutância estomática ao vapor de água (g_s) e da taxa transpiratória (E) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

relativos da g_s , em relação à testemunha, verifica-se que nas tangerineiras houve maior aumento em comparação aos limoeiros (Quadros 1 e 2), não sendo detectadas diferenças significativas entre as duas tangerineiras ou entre os dois limoeiros.

Os efeitos do Al sobre a g_s observados nesta pesquisa, discordam daqueles reportados por NUNES et al. (1995) em triticales e MOUSTAKAS et al. (1996) em trigo, que verificaram diminuição de 42% e de 38% da g_s com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. Porém, LIDON et al. (1997) verificaram aumento de 52% da g_s , em plantas de milho, até a concentração de 1 mmol L^{-1} de Al, diminuindo novamente nas maiores concentrações. SIMON et al. (1994b) também verificaram esse tipo de resposta em tomateiro, onde o Al, na concentração de $25 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, causou aumento de 38% no valor da g_s em relação ao controle. Já na maior concentração avaliada ($50 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$) houve diminuição de 62% no valor da g_s em relação ao controle. Portanto, verifica-se que a influência do Al sobre a g_s é muito variável, dependendo principalmente da espécie ou variedade, além da atividade do Al na solução nutritiva.

A modificação da g_s pelo Al pode estar relacionada com a alteração da relação $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ nas células guardas e, ou com a alteração da concentração do ácido abscísico (ABA), visto que ambos controlam o movimento estomático (LINDBERG e WINGSTRAND, 1985; POSCHENRIEDER et al., 1989).

Não foi verificado efeito significativo do Al sobre a taxa transpiratória (E) no limoeiro VL. No CR e na CL, aumentou linearmente em função da concentração de Al na solução nutritiva. Na SK houve também aumento da E, atingindo o máximo valor estimado ($9,73 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) com $272 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (Figura 3).

As tangerineiras apresentaram maiores valores absolutos da E em comparação com os limoeiros (Figura 3). Considerando a média dos valores relativos, em relação à testemunha, verifica-se que nas tangerineiras houve maior aumento da E em comparação aos limoeiros (Quadros 1 e 2).

De forma semelhante às outras características já mencionadas, a taxa transpiratória da planta, em resposta ao Al, depende de vários fatores. Em plantas de trigo submetidas a concentrações de Al que variaram de 0 até 300

$\mu\text{mol L}^{-1}$, verificou-se diminuição da E com o aumento da concentração. Já em plantas de sorgo, verificou-se o contrário (OHKI, 1986).

MOUSTAKAS et al. (1996) verificaram diminuição de 28% da E em plantas de *Thinopyrum bessarabicum* submetidas a 1 mmol L^{-1} de Al durante 48 horas. Em várias espécies florestais crescidas em solos ácidos, com elevado teor de Al^{+3} , verificou-se diminuição da E (REICH et al., 1994).

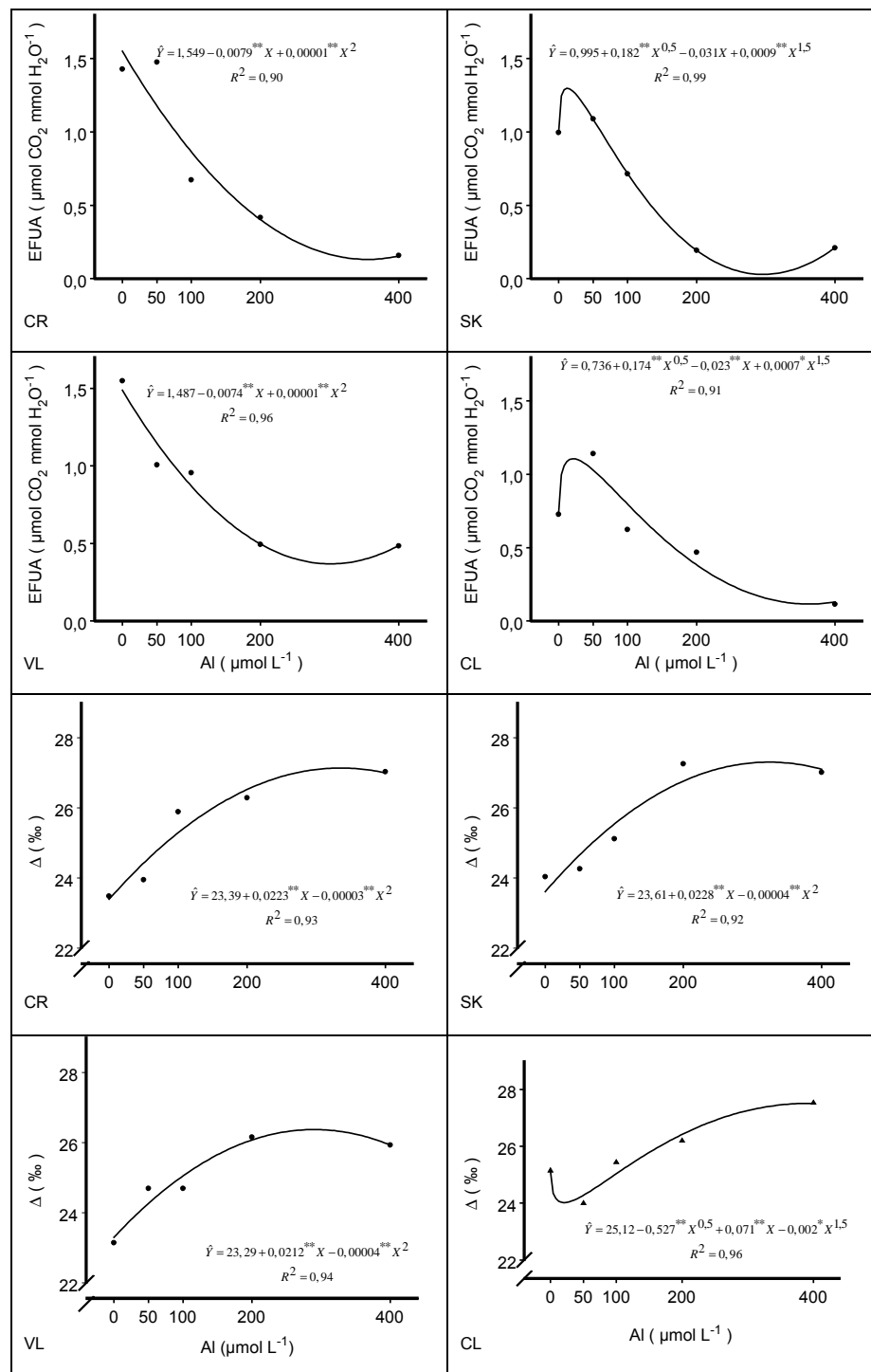
Como na maioria dos casos existe correlação positiva entre a condutância estomática ao vapor da água (g_s) e a taxa transpiratória (E), desde que as plantas estejam em condições ambientais semelhantes, é provável que os motivos mencionados para a g_s , sejam também responsáveis pelo aumento da E.

3.1.3. Eficiência fotossintética do uso da água (EFUA) e discriminação isotópica do carbono (Δ)

Verificou-se que o Al causou diminuição da eficiência fotossintética do uso de água (EFUA) nos dois limoeiros (Figura 4). Nas tangerineiras, houve aumento inicial da EFUA, atingindo valores máximos com 30 e 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na SK e na CL, respectivamente. Esses aumentos foram devido ao aumento da taxa de fotossíntese líquida (Figura 1).

Considerando os valores absolutos, na ausência do Al, a EFUA dos limoeiros foi maior que a EFUA das tangerineiras. A tangerineira CL apresentou maior incremento percentual em comparação à SK. Considerando os valores em relação à testemunha, verifica-se que os limoeiros apresentaram maior inibição em relação às tangerineiras. Destas, a CL foi o porta-enxerto menos afetado pelo alumínio (Quadros 1 e 2).

A EFUA é uma importante característica que permite conhecer o potencial de adaptação de espécies ou variedades de plantas a condições de deficiência hídrica. OHKI (1986) verificou que o Al diminuiu a EFUA em trigo e sorgo, devido ao aumento da transpiração e à diminuição da A, de forma semelhante aos resultados verificados no presente experimento. Porém, SIMON et al. (1994b) verificaram que o Al, na concentração de $50 \mu\text{mol L}^{-1}$, aumentou 56%, em relação ao controle, a EFUA em uma das variedades avaliadas de tomateiro, devido à diminuição da taxa transpiratória.



*, ** = Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 4 – Estimativa da eficiência fotossintética do uso da água (EFUA) e da discriminação isotópica do carbono (Δ) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Ao contrário da EFUA, a tangerineira CL apresentou diminuição inicial da discriminação isotópica do carbono (Δ) em função da concentração do alumínio (Figura 4), aumentando a partir de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Nos demais porta-enxertos, houve acréscimo curvilíneo da Δ . Como foi verificada correlação negativa entre a EFUA e a Δ ($r=-0,95$, $P=0,0001$), existem indícios de que o decréscimo da EFUA provocado pelo Al ocorreu durante a maior parte do período de 70 dias avaliado. Em valores relativos, verificam-se as mesmas diferenças mencionadas para a EFUA, entre os porta-enxertos (Quadros 1 e 2).

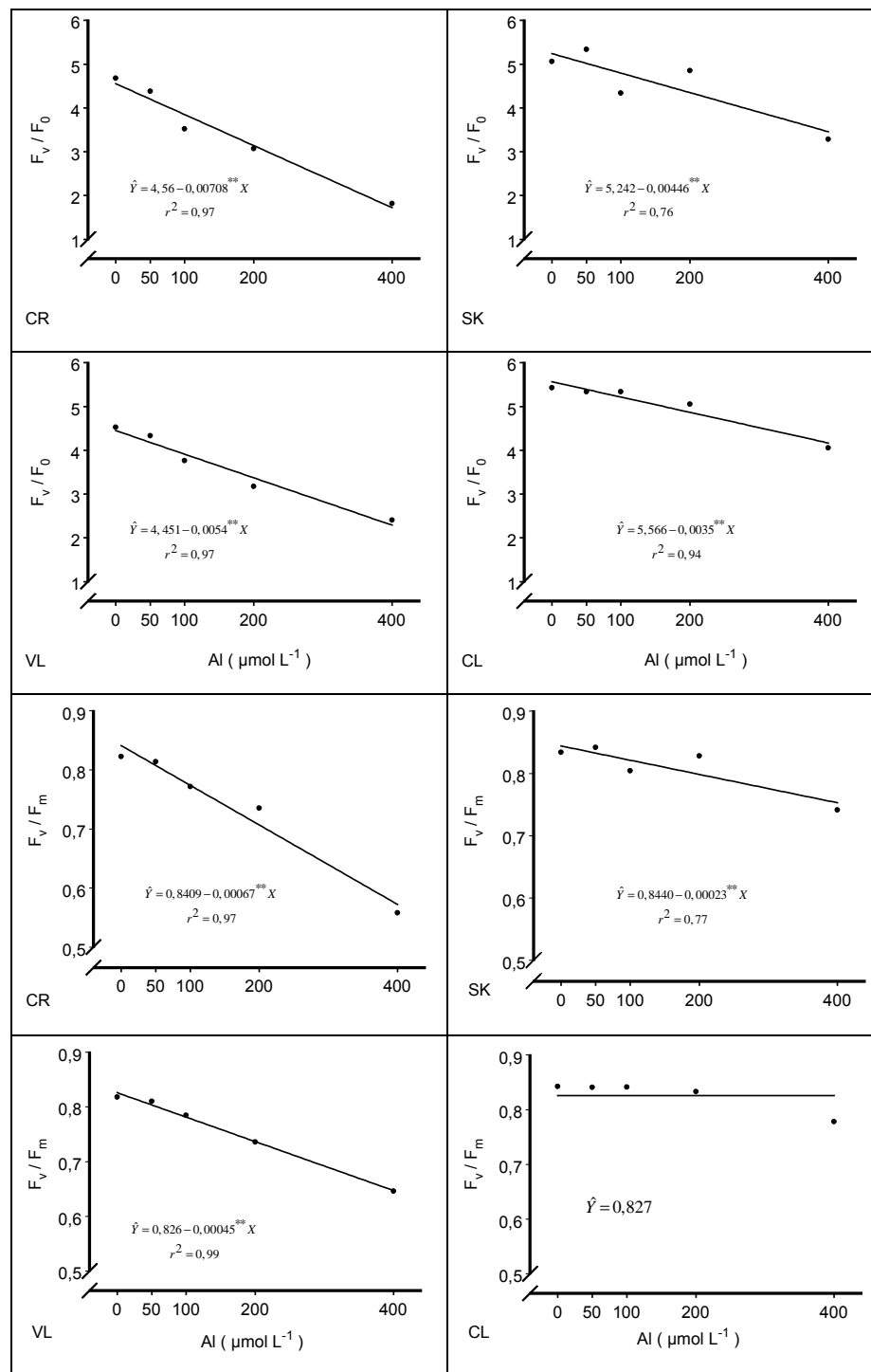
3.2. Fluorescência da clorofila

Em todos os porta-enxertos avaliados, a relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (F_v/F_0) diminuiu com o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva (Figura 5). Nos limoeiros, esse decréscimo foi muito mais acentuado em comparação às tangerineiras, nas quais observou-se diminuição acentuada somente na maior concentração de Al.

Considerando o valor relativo médio da relação F_v/F_0 em todas as concentrações de Al, verifica-se que o efeito negativo do Al foi significativamente maior nos limoeiros (Quadros 1 e 2), não sendo detectadas diferenças entre os dois limoeiros ou entre as duas tangerineiras.

Essa diminuição da relação F_v/F_0 é um indicador de danos estruturais que ocorrem nos tilacóides, afetando o transporte fotossintético de elétrons (HAVAUX e LANNOYE, 1983), sem importar se a diminuição foi devida ao aumento da F_0 ou à diminuição da F_v . O aumento da F_0 é característico da destruição dos centros de reação do PII (Baker e Horton, citados por MOUSTAKAS e OUZOUNIDOU, 1995). Nesta pesquisa, a diminuição da relação F_v/F_0 foi devida ao decréscimo da F_v .

MOUSTAKAS et al. (1993) verificaram também que a relação F_v/F_0 em duas cultivares de trigo submetidas a $148 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al diminuiu de 52 a 64%, em relação à testemunha. Resultados semelhantes foram verificados em plantas de milho submetidas à seca (HAVAUX e LANNOYE, 1983) e em



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 5 – Estimativa da relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (F_v/F_0) e entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (F_v/F_m) dos limoieiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

plantas de café submetidas às baixas temperaturas do inverno (DA MATTA et al., 1997).

Nos limoeiros, especialmente no CR, nos quais a diminuição da relação F_v/F_0 foi muito acentuada (Figura 5), ocorreram simultaneamente as maiores diminuições da A (Figura 1).

Nos limoeiros e na SK, a relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (F_v/F_m) diminuiu com o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva (Figura 5). Na tangerineira CL não foram detectados efeitos significativos do Al.

Considerando o valor relativo médio da relação F_v/F_m , verifica-se novamente maior efeito negativo do Al nos limoeiros em comparação às tangerineiras (Quadros 1 e 2).

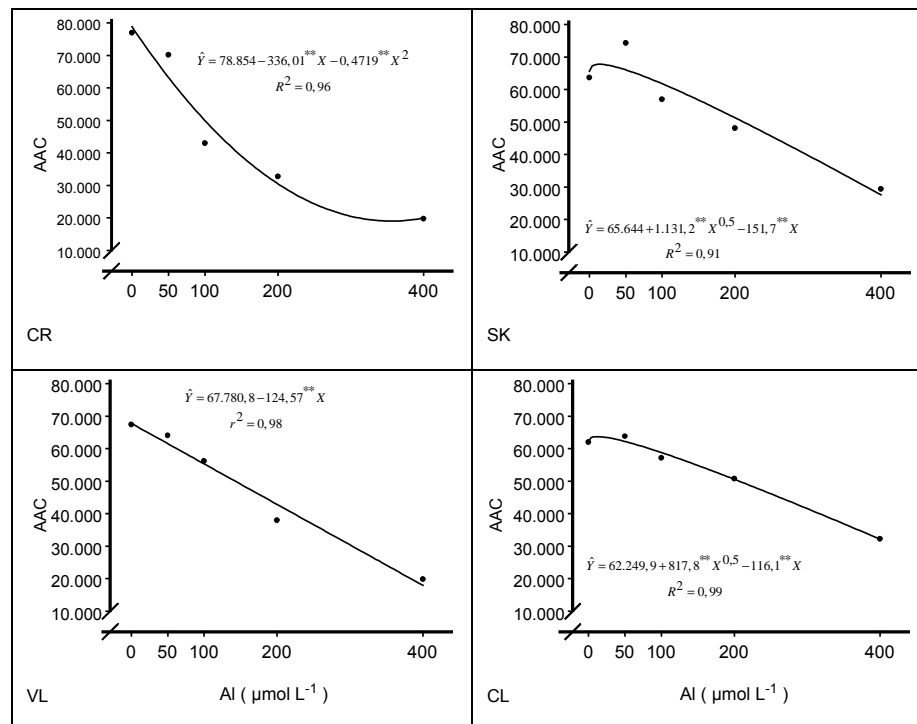
A relação F_v/F_m expressa o rendimento quântico dos processos fotoquímicos do fotossistema II (PSII), (LAZÁR, 1999), ou seja, a eficiência relativa da captura de energia luminosa pelo PSII. Resultados semelhantes aos verificados neste experimento foram obtidos em duas gramíneas expostas ao alumínio (MOUSTAKAS et al., 1993; MOUSTAKAS e OUZOUNIDIU, 1994), em que se verificou que a relação F_v/F_m teve menor percentagem de inibição em comparação à relação F_v/F_0 , ou que o Al não afetou a relação F_v/F_m , respectivamente.

A área acima da curva de fluorescência (AAC) diminuiu nos limoeiros na presença do alumínio na solução nutritiva. Nas tangerineiras, houve aumento inicial da AAC na presença de baixas concentrações de alumínio ($20 \mu\text{mol L}^{-1}$), diminuindo a partir de concentrações maiores (Figura 6).

Considerando o valor relativo médio da AAC, verifica-se maior efeito negativo do Al nos limoeiros em comparação às tangerineiras (Quadros 1 e 2).

A área acima da curva de fluorescência, entre F_0 e F_m , é proporcional ao tamanho do “pool” de receptores de elétrons no lado redutor do PSII. Se a transferência de elétrons for bloqueada na plastoquinona B (Q_B) por algum fator estressante que atue sobre a planta, a AAC diminuirá significativamente porque a reoxidação da Q_A não poderá ocorrer (BOLHÀR e ÖQUIST, 1993).

Em muitas situações, a área acima da curva de fluorescência em plantas expostas a várias condições de estresse diminui significativamente. Por



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 6 – Estimativa da área acima da curva de fluorescência (AAC) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

exemplo, várias espécies florestais adaptadas às condições de baixa luminosidade, quando foram expostas diretamente à luz do sol sofreram considerável diminuição da eficiência fotoquímica, concomitantemente com a diminuição da área acima da curva (JOSHI, 1995). Em variedades de trigo expostas a doses elevadas de cobre CISCATO et al. (1997), ou à presença de ozônio (MAGGS e ASHMORE, 1998) verificaram-se decréscimo da AAC, de forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa.

Por outro lado, LU e VONSHAK (1999) verificaram em células de *Spirulina* adaptadas à salinidade, aumento da AAC com o aumento da concentração de NaCl na solução nutritiva.

Dentre as características relacionadas com a fluorescência da clorofila *a* avaliadas nesta pesquisa, a área acima da curva de fluorescência apresentou maior sensibilidade aos efeitos do alumínio, pois apresentou maiores

diminuições dos valores relativos em comparação às relações F_v/F_0 e F_v/F_m (Quadro 1; Figuras 5 e 6).

Nesta pesquisa verificou-se, em todos os porta-enxertos avaliados, que com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva não houve restrição estomática à entrada de CO_2 às folhas, aumentando a C_i . Todavia, este aumento não resultou em aumento da A , indicando a existência de limitações não estomáticas ao processo fotossintético impostas pelo Al. Algumas destas limitações foram, provavelmente, os danos estruturais sofridos pelos tilacóides, evidenciados pela diminuição da relação F_v/F_0 , e a diminuição do número de receptores de elétrons no PSII (AAC).

3.3. Teor de clorofila

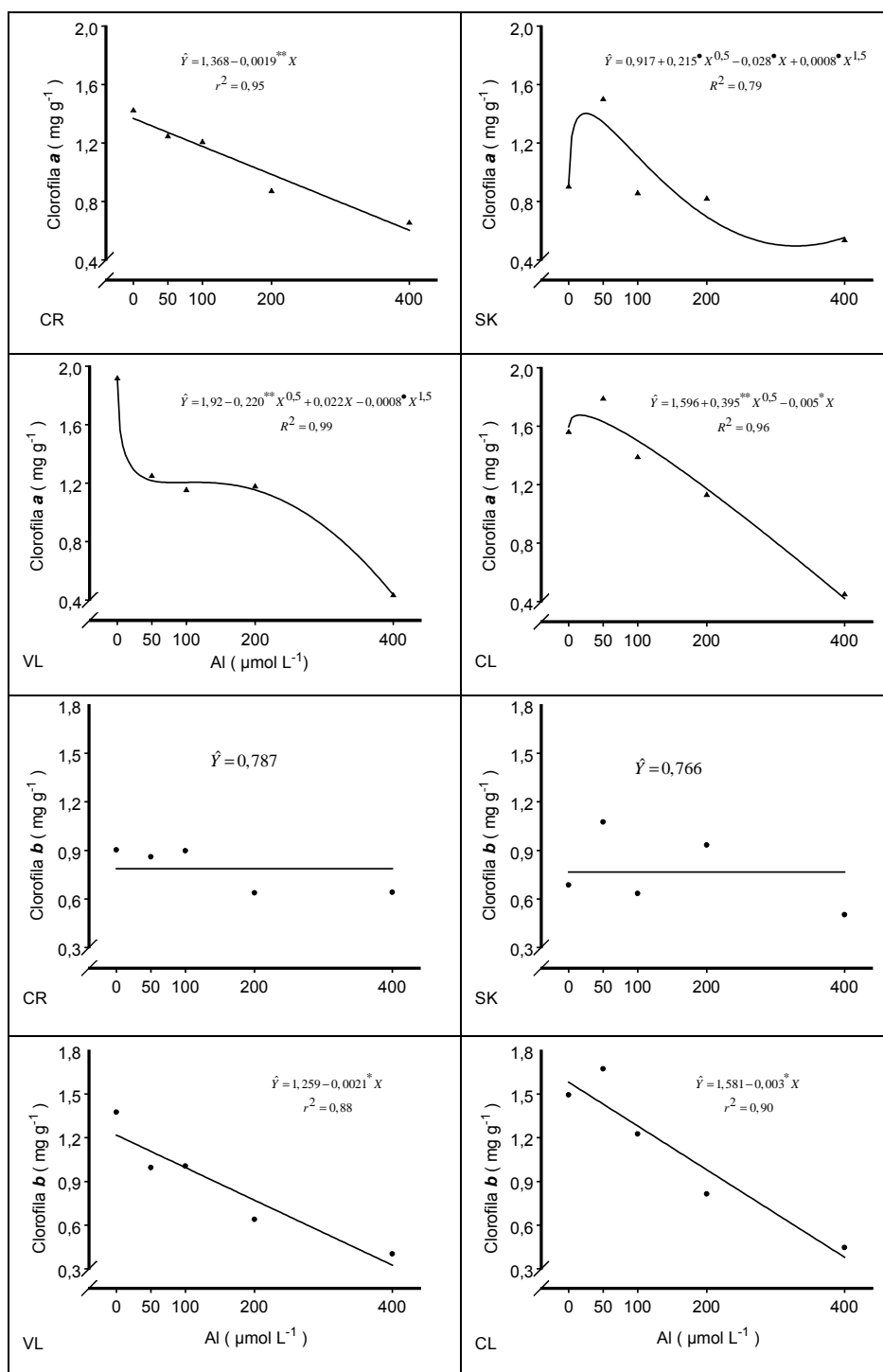
Nos limoeiros, houve decréscimo do teor de clorofila *a* (Chl_a) com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. Nas tangerineiras, verificou-se aumento dessa característica na presença de baixas concentrações de Al (16 a 25 $\mu\text{mol L}^{-1}$), ocorrendo decréscimo com maiores concentrações (Figura 7).

Em valores relativos, houve maior diminuição da Chl_a nos limoeiros em comparação às tangerineiras (Quadros 1 e 2). Nestas, houve maior diminuição na CL.

Não foi verificado efeito significativo do alumínio sobre o teor de clorofila *b* (Chl_b) no limoeiro CR e na tangerineira SK. Por outro lado, no limoeiro VL e na tangerineira CL houve decréscimo do Chl_b com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva (Figura 7).

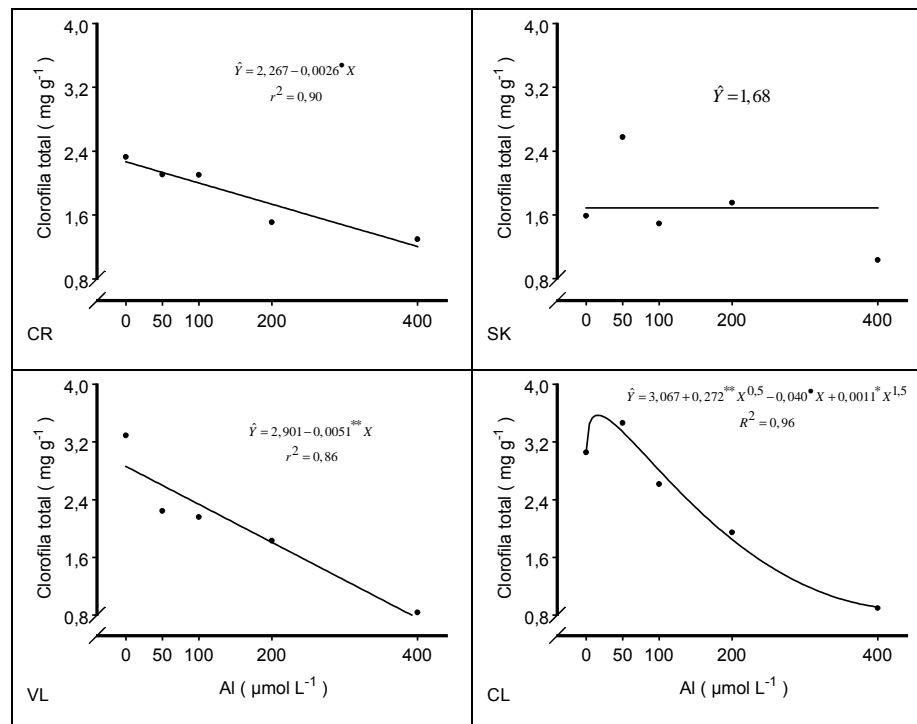
Houve decréscimo do teor de clorofila total (Chl_t) nos dois limoeiros em função do aumento da concentração de Al na solução nutritiva. Na tangerineira CL houve aumento inicial da Chl_t até 16 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Na tangerineira SK não foi verificado efeito significativo do Al sobre o teor de Chl_t (Figura 8).

Em valores relativos da Chl_b e da Chl_t , verificaram-se as mesmas diferenças entre os porta-enxertos mencionadas para o Chl_a (Quadros 1 e 2).



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 7 – Estimativa do teor foliar de clorofila a e de clorofila b dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 8 – Estimativa do teor foliar de clorofila total dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

A clorofila *a* está presente em todos os organismos capazes de realizar fotossíntese oxigênica, funcionando como o doador primário de elétrons no centro de reação do PSII e do PSI. É também o principal pigmento do complexo coletor de luz (LHC), com picos de absorvância da luz em 430 nm e em 680 nm. A clorofila *a* é acompanhada pela clorofila *b*, que apresenta picos de absorvância na faixa verde do espectro (SANDMANN e SCHEER, 1998).

De forma semelhante aos resultados verificados nesta pesquisa, outros pesquisadores têm reportado que o Al provoca diminuição do teor foliar de clorofila (Chl). Por exemplo, OHKI (1986) verificou que nas folhas de trigo e de sorgo submetidas a concentrações de Al de até 300 μmol L⁻¹, o teor de clorofila diminuiu em até 70% em relação ao controle. Todavia, SIMON et al. (1994b) não verificaram efeito significativo do Al, até a concentração de 50 μmol L⁻¹, em duas variedades de tomateiro.

Uma possível explicação para a diminuição do teor de clorofila provocada pelo Al poderia ser o decréscimo do teor foliar de nutrientes componentes da sua molécula (Capítulo 3). Outra possibilidade é o efeito direto do Al sobre a biossíntese da clorofila, pois de acordo com STOBART et al (1985), alguns elementos metálicos, como o cádmio, reagem com enzimas essenciais para a síntese da clorofila a partir do ácido 5-aminomevulênico (ALA).

Nesta pesquisa, verificou-se maior diminuição relativa da taxa fotossintética líquida (A) na tangerineira SK em comparação à CL, porém, foi verificado o contrário para o teor de clorofila (Quadros 1 e 2). Isso é indicativo de que outros fatores foram responsáveis por essa diferença observada na A. Por outro lado, para a maior diminuição relativa da A nos limoeiros, houve também maior diminuição relativa do teor de clorofila (Quadros 1 e 2).

3.4. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais, aplicada na matriz de correlações dos valores relativos das características da fotossíntese e da fluorescência da clorofila, permitiu identificar dois componentes principais, que representam 93% da variância total das características originais (Quadro 3).

O primeiro componente representa as características da fluorescência da clorofila, da taxa fotossintética líquida e da eficiência do uso da água, contrastadas com a C_i e a Δ . Portanto, se determinado porta-enxerto apresenta escores maiores em relação a outro, será porque apresenta maiores valores relativos do primeiro grupo de características (com autovetores positivos). O segundo componente principal está correlacionado com a condutância estomática (g_s) e a taxa transpiratória (E), representando basicamente a abertura estomática (Quadro 3).

De acordo com a classificação baseada nos escores dos dois primeiros componentes principais, verifica-se que, considerando todas as características relacionadas com as trocas gasosas e com a fluorescência da clorofila determinadas nesta pesquisa, os limoeiros foram os porta-enxertos mais

Quadro 3 – Autovetores em dois componentes principais (CP1 e CP2) dos valores relativos à testemunha, da taxa de fotossíntese líquida (**A**); da concentração interna de CO₂ (**C_i**); da condutância estomática ao vapor de água (**g_s**); da taxa transpiratória (**E**), da eficiência fotossintética do uso da água (**EFUA**); da discriminação isotópica de carbono (**Δ**); da relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (**F_v/F₀**); da relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (**F_v/F_m**) e da área acima da curva de fluorescência (**AAC**) de quatro porta-enxertos cítricos submetidos a estresse por alumínio

Características	CP1	CP2
A	0,37	0,08
C _i	-0,38	-0,05
g _s	-0,14	0,67
E	-0,20	0,61
EFUA	0,38	-0,12
Δ	-0,38	0,04
F _v /F ₀	0,36	0,25
F _v /F _m	0,33	0,30
AAC	0,38	0,11
λ	6,46	1,92
VAC (%)	72	93

λ = Autovalor da matriz de correlação.

VAC = variância acumulada.

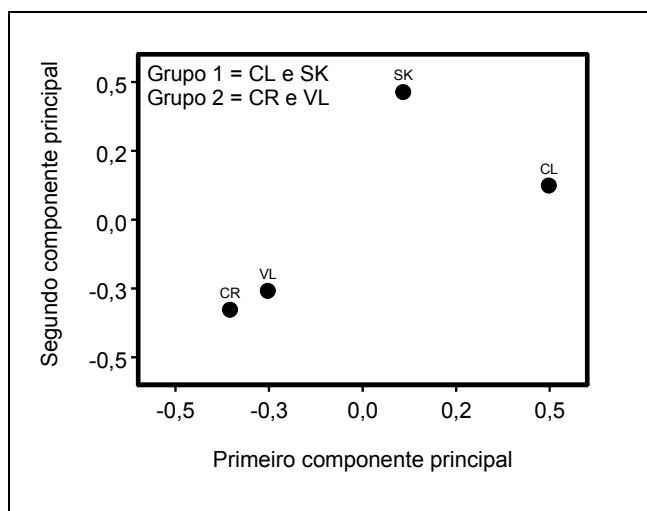


Figura 9 – Agrupamento dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), baseado nos escores do primeiro e do segundo componente principal.

afetados pelo alumínio, em comparação às tangerineiras (Figura 9). Destas, a CL apresentou menor inibição da A e da EFUA (Quadros 1 e 2) em comparação à SK.

Esses resultados explicam de certa forma alguns dos motivos pelos quais a tangerineira 'Cleópatra', baseando-se nas características do crescimento, é considerada como um dos porta-enxertos cítricos mais tolerantes ao alumínio (LIN e MYHRE, 1991a; PINTO, 1999).

4. CONCLUSÕES

A presença de 14, 18 e 55 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva estimulou a taxa fotossintética líquida (A) nos porta-enxertos CR, SK e CL, respectivamente, verificando-se decréscimo com o aumento da concentração. No limoeiro VL houve efeito inibitório do Al, mesmo em baixas concentrações. Os maiores efeitos inibitórios do Al sobre a A foram verificados nos limoeiros. Com o aumento da concentração de Al, houve incremento da C_i em todos os porta-enxertos, evidenciando que as restrições estomáticas não foram as responsáveis pela diminuição da A.

A condutância estomática ao vapor de água (g_s) e a taxa transpiratória (E) aumentaram na presença do alumínio nas duas tangerineiras. Nos dois limoeiros, não foram verificados efeitos significativos do Al sobre a g_s . No limoeiro CR, a E aumentou em função das concentrações de Al.

A eficiência do uso da água aumentou na presença de baixas concentrações de Al (30 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$) nas duas tangerineiras, ocorrendo decréscimo em concentrações maiores. Nos limoeiros, houve decréscimo desta característica mesmo em baixas concentrações de Al. Índícios de que esses resultados mencionados ocorreram durante a maior parte do ciclo foram fornecidos pelos valores estimados da discriminação isotópica de carbono.

Todas as características relacionadas com a fluorescência da clorofila diminuíram em função das concentrações de Al, com exceção da relação F_v/F_m na tangerineira CL. Em valores relativos, a maior diminuição foi verificada

nos limoeiros. A área acima da curva de fluorescência foi a característica mais afetada pelo Al.

A presença de baixas concentrações de Al (16 a 25 $\mu\text{mol L}^{-1}$) aumentou o teor foliar de clorofila *a* nas tangerineiras, verificando-se decréscimo com o aumento da concentração. Nos limoeiros, houve efeito inibitório do Al, mesmo em baixas concentrações. No VL e na CL ocorreram decréscimo do teor de clorofila *b*. Com exceção da tangerineira SK, foi verificado efeito significativo do Al sobre o teor foliar de clorofila total. Os maiores efeitos inibitórios do Al foram verificados nos limoeiros.

De acordo com a análise de componentes principais, as tangerineiras foram os porta-enxertos mais tolerantes ao Al, principalmente a 'Cleópatra'.

CAPÍTULO 2

CRESCIMENTO DE QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO EM CULTIVO HIDROPÔNICO

1. INTRODUÇÃO

A toxicidade de alumínio (Al) é caracterizada, morfológicamente, pelo engrossamento e paralisação do crescimento das raízes, devido ao endurecimento da parede celular e a inibição da divisão celular (FOY, 1978) e, fisiologicamente, pela alteração da absorção e utilização de nutrientes, principalmente o P (CANAL e MIELNICZUK, 1983).

A formação de fosfatos de alumínio na superfície radicular, nas paredes celulares e no espaço livre das raízes, torna o P menos disponível para as células. Como o Al associa-se às membranas, inclusive interferindo na divisão celular, prejudicando a síntese de DNA e a fosforilação de açúcares, o resultado é a diminuição da absorção de P pelas plantas (RHEINHEIMER et al., 1992). De acordo com BENNET et al. (1991), a lesão primária por Al envolve alvos extracelulares, o qual significa que o Al não precisa penetrar a membrana para iniciar o processo fitotóxico.

De acordo com ANDERSSON (1988), os seguintes estádios de danos por Al podem ser observados nas raízes das plantas vasculares: **estádio 0**- desenvolvimento normal, sem dano nenhum; **estádio 1**- as pontas das raízes

primárias se apresentam danificadas ou mortas, mas, as plantas são capazes de originar novas raízes provenientes de tecidos intactos, onde a aparição das raízes laterais normalmente é suprimida pela dominância apical; **estádio 2-** as pontas das raízes se tornam descoloridas e necróticas. A rizoderme é desintegrada e o córtex é facilmente removido do cilindro central. Às vezes, aparecem grande número de raízes laterais curtas e raízes com aspecto de coral; **estádio 3-** as raízes secam ou morrem, ficam totalmente necróticas, não havendo formação de raízes laterais.

As raízes danificadas por alumínio são, caracteristicamente, curtas, grossas e quebradiças, com ausência de ramificações finas, sendo pouco eficientes na absorção de água e de nutrientes (FOY, 1974).

O alumínio, em concentrações elevadas, pode causar severas anormalidades citológicas, resultando em menor crescimento radicular, possivelmente, por afetar o alongamento e a divisão celular. É comumente aceito que o alumínio afeta a divisão celular por aumentar a estabilidade da dupla hélice, dificultando a replicação de DNA na interfase (MORIMURA e MATSUMOTO, 1978) e o alongamento celular por reduzir a plasticidade e a elasticidade da parede celular.

KESER et al. (1975, 1977) verificaram a ocorrência de graves anomalias morfológicas nas zonas de crescimento radicular em variedades de beterraba açucareira sensíveis ao Al, sendo que células corticais eram grandes, anormais e divididas irregularmente, e apresentavam desintegração na região da coifa e do córtex, tornando a região apical indistinguível.

Tecidos meristemáticos de raízes de aveia cultivadas em solução nutritiva, contendo $400 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, tiveram maior número de vacúolos, porém, as células permaneceram intactas após longo período de exposição ao Al, não sendo observadas alterações ultraestruturais, como por exemplo do núcleo. O Al localizou-se predominantemente nas paredes das células do córtex, sugerindo que a membrana plasmática é uma barreira muito eficiente para impedir a entrada do Al no citoplasma (MARIENFELD et al., 1995).

Raízes de *Pynus* de um ano de idade expostas ao Al sofreram degeneração das células meristemáticas, menor divisão celular, deformação

das paredes celulares e maior grau de lignificação e de suberização. Também foi verificada diminuição do crescimento do sistema radicular e da parte aérea, com menor alocação da biomassa total para o sistema radicular (OLEKSYN et al., 1996).

O alumínio inibiu, após uma hora de exposição, o crescimento do sistema radicular de *Cucurbita maxima*, na zona de crescimento ativo correspondente até 6 mm do ápice, devido à inibição da divisão celular e à alteração do metabolismo dos polissacarídeos da parede celular, tanto na zona de alongamento como fora dela (VAN et al., 1994).

Em plantas de milho expostas a concentrações de 0 até 6,08 mg L⁻¹ de Al na solução nutritiva, o comprimento e o peso da matéria seca do sistema radicular e da parte aérea diminuíram progressivamente com o aumento da concentração de Al. As raízes ficaram atrofiadas e engrossadas (VALENCIA, 1992).

Efeitos semelhantes foram verificados em mudas de *Picea albis*, onde o crescimento do sistema radicular foi drasticamente inibido quando submetidas a 4,37 mg L⁻¹ ou a 6,55 mg L⁻¹ de Al (GODBOLD e JENTSCHKE, 1988).

Além do sistema radicular, o Al afeta o crescimento da parte aérea. Os mecanismos propostos para explicar essa alteração, provocada pelo Al, incluem: **a)** diminuição da divisão e do alongamento celular nas raízes, resultando em exploração limitada do solo para a absorção e translocação de nutrientes e de água, **b)** interação de Al³⁺ com elementos essenciais (Ca, Mg, P), resultando no decréscimo da absorção e da translocação dos mesmos, induzindo à sintomas de deficiência e, **c)** translocação de quantidades tóxicas de Al à parte aérea da planta (FOY, 1988).

De acordo com FOY (1974), os sintomas foliares de toxidez de alumínio assemelham-se, geralmente, à deficiência de fósforo (atrofiamento das folhas, que apresentam coloração púrpura) ou deficiência de cálcio (enrolamento das folhas jovens, colapso do ápice da planta e dos pecíolos).

MAGALHÃES (1987) avaliou a tolerância de porta-enxertos de citros ao Al adicionado ao solo, verificando que o Al influenciou significativamente no

crescimento do sistema radicular e da parte aérea, sendo o limoeiro 'Rugoso da Florida' o mais tolerante ao Al, seguido da tangerineira 'Cleópatra' e do limoeiro 'Cravo'.

Para as culturas anuais existem grandes quantidades de pesquisas realizadas com o objetivo de avaliar os efeitos do alumínio sobre o crescimento da planta. Porém, para as espécies frutíferas, em geral, e para os citros, em particular, existem poucas pesquisas publicadas sobre esse assunto.

Como as características relacionadas com o crescimento são o principal critério utilizado para conhecer o grau de tolerância ao alumínio de uma espécie ou variedade, é importante avaliar o efeito do alumínio sobre o crescimento dos porta-enxertos cítricos, de forma a possibilitar a exploração comercial de solos que apresentam teores elevados desse elemento.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos do alumínio sobre o crescimento do sistema radicular e da parte aérea de quatro porta-enxertos de citros, além de avaliar algumas características relacionadas com a partição de fotoassimilados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os itens do Material e Métodos deste capítulo foram os mesmos apresentados no Capítulo 1 (itens 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, e 2.6). Em seqüência, a massa da matéria fresca de toda a planta foi determinada no início e no final do experimento, com a qual foi estimada a taxa relativa de crescimento (TRC) de acordo com HUNT (1990):

$$TRC = \frac{\ln Y_2 - \ln Y_1}{t_2 - t_1}$$

Onde:

TRC = taxa relativa de crescimento

\ln = logaritmo neperiano

Y_1 = valor numérico da massa de matéria fresca no tempo t_1

Y_2 = valor numérico da massa de matéria fresca no tempo t_2 .

A área foliar foi determinada utilizando-se medidor de área portátil (DELTA-T, modelo MK2, Delta-T Devices Ltd., England). Posteriormente, as mudas foram colocadas em estufa de ventilação forçada a 70°C até peso constante, sendo determinadas as massas da matéria seca do sistema radicular, das folhas e dos caules. Estimou-se a relação raiz parte aérea com base na massa de matéria seca. A relação de área foliar (RAF) foi estimada dividindo a área foliar pela massa de matéria seca total da muda. A relação de massa foliar (RMF) foi estimada dividindo a massa de matéria seca foliar pela massa de matéria seca total da muda.

O comprimento e a área total do sistema radicular foram determinados mediante digitalização das raízes num scanner de mesa. A resolução das imagens foi de 300 dpi, com coloração em preto e branco. Posteriormente, as imagens foram processadas no software Sigma Scan Pro 5.0 Demo (www.spss.com).

Para o efeito, foi feita a calibração das medidas, utilizando barbantes de comprimento conhecido (**Image – Calibrate – Calibrate distance and area – 2 Point rescaling**). Depois de abrir cada imagem das raízes escaneadas, foi feita a identificação e a separação dos segmentos do sistema radicular, como pode ser observado na Figura 1, mediante a seguinte seqüência de procedimentos: **Image – Treshold – Intensity treshold – Intensity 0 to 1**. Finalmente, determinaram-se o comprimento e a área total do sistema radicular mediante a seguinte seqüência de procedimentos: **Measurements – Count objects – Measure objects**. Procedimentos semelhantes para avaliação do sistema radicular são reportados na literatura (DOWDY et al., 1995; KASPAR e EWING, 1997; STEVENS et al., 2000).

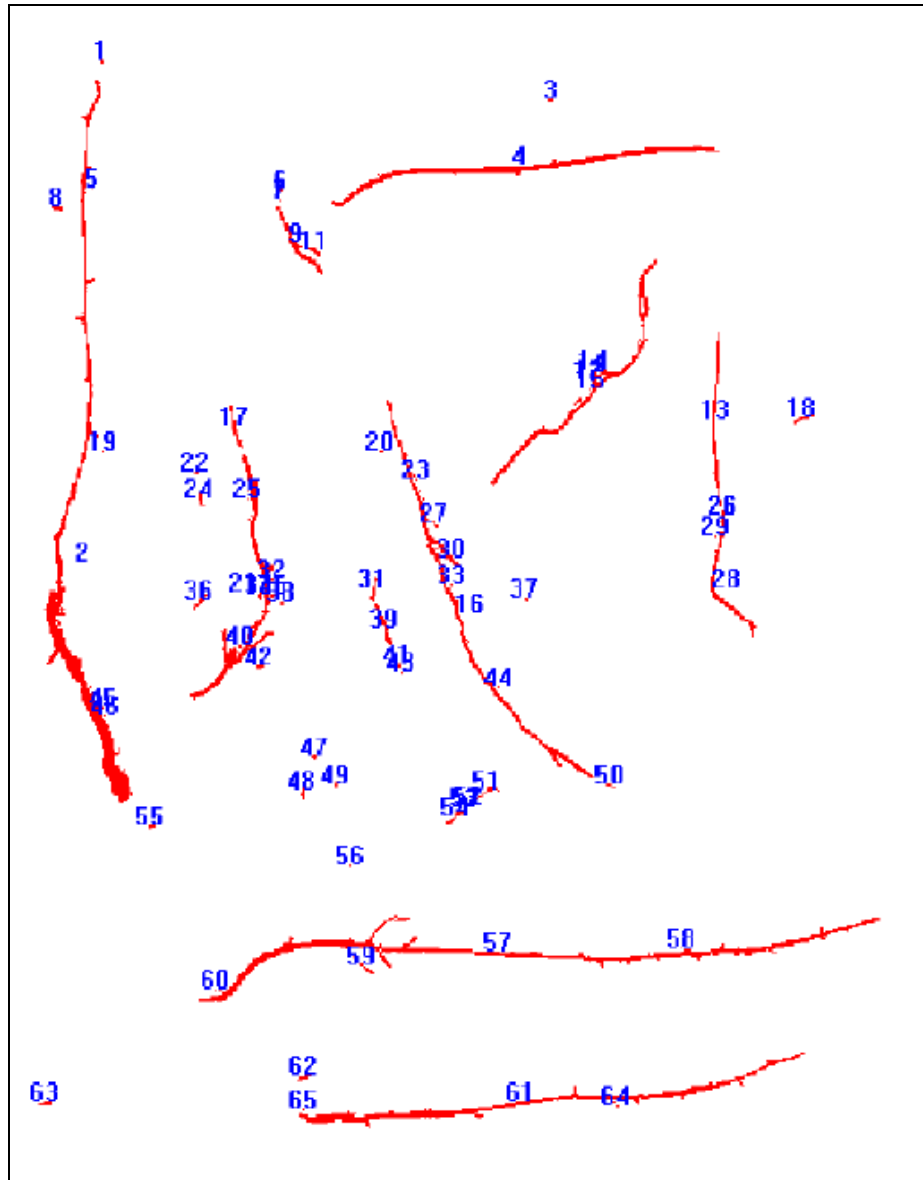


Figura 1 – Separação e identificação de segmentos radiculares para determinação do comprimento e da área total do sistema radicular, mediante o software Sigma Scan Pro 5.0 Demo.

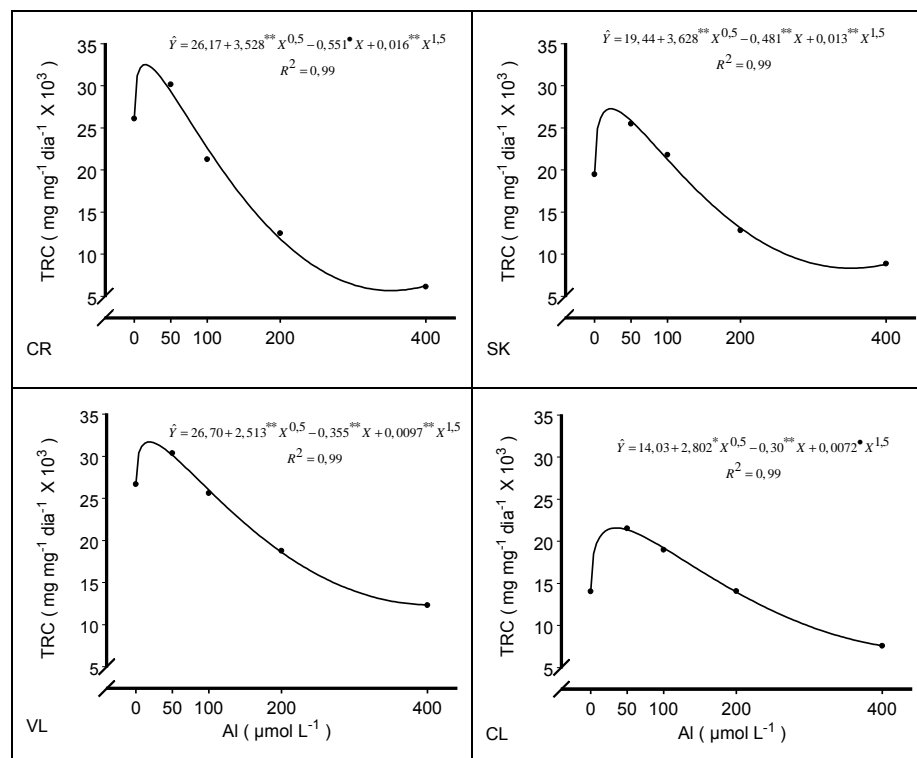
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Taxa relativa de crescimento

Para todos os porta-enxertos, a taxa relativa de crescimento (TRC), em massa de matéria fresca de toda a planta, aumentou inicialmente na presença do alumínio na solução nutritiva, atingindo valores máximos entre 15 (CR) a 35 (CL) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, decrescendo, posteriormente na presença de concentrações maiores. Esse aumento inicial, em valores percentuais, foi maior nas tangerineiras. Em valores originais, os limoeiros apresentaram maiores valores de TRC na ausência de alumínio na solução nutritiva (Figura 2).

Em valores percentuais, a TRC da tangerineira SK foi mais afetada em comparação à tangerineira CL (Quadros 1 e 2). Não foi detectada diferença entre os dois limoeiros, os quais foram mais inibidos pelo alumínio em comparação com as duas tangerineiras.

A taxa relativa de crescimento é considerada como “índice de eficiência” da planta e, expressa o crescimento em termos de uma taxa de aumento da massa por unidade de massa presente, permitindo comparações mais equitativas que a taxa absoluta de crescimento. Normalmente, a TRC é expressa com base na matéria seca, porém, outras medidas podem ser utilizadas (HUNT, 1990).



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 2 – Estimativa da taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta (TRC) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Quadro 1 – Média (%) dos valores, em relação à testemunha, nas cinco doses de alumínio, das características relacionadas com o crescimento dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Características	Porta-enxertos			
	CR	SK	VL	CL
Taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta	71,5	90,8	85,3	108,6
Massa de matéria seca radicular	88,8	146,5	154,9	156,0
Área total do sistema radicular	89,9	152,9	140,1	171,9
Comprimento total do sistema radicular	90,0	146,6	133,7	192,6
Área foliar	54,1	74,3	72,9	66,6
Massa de matéria seca foliar	51,1	71,5	65,7	63,5
Massa de matéria seca do caule	62,5	70,9	92,3	75,6
Relação raiz parte aérea	213,9	223,7	234,0	273,5
Relação de área foliar	77,1	80,4	74,2	70,7
Relação de massa foliar	71,9	76,7	66,3	66,2

Quadro 2 – Estimativa do contraste dos valores (%), em relação à testemunha, nas cinco doses de alumínio, das características relacionadas com o crescimento dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Características	Contrastes		
	CR vs VL	SK vs CL	LIM. vs TAN.
Taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta	-13,8	-17,8 *	-21,3 **
Massa de matéria seca radicular	-66,1 **	-9,5	-29,4 **
Área total do sistema radicular	-50,2 **	-19,1	-47,4 **
Comprimento total do sistema radicular	-43,7 **	-46,0 **	-57,8 **
Área foliar	-18,8 **	7,8	-7,0
Massa de matéria seca foliar	-14,6 *	8,0	-9,1 *
Massa de matéria seca do caule	-29,8 **	-4,7	4,2
Relação raiz parte aérea	-20,2	-49,8 **	-24,7 **
Relação de área foliar	2,9	9,8 **	0,1
Relação de massa foliar	5,6 *	10,5 **	-2,4

Lim. = Limoeiros ; Tan. = Tangerineiras.

*, ** : significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

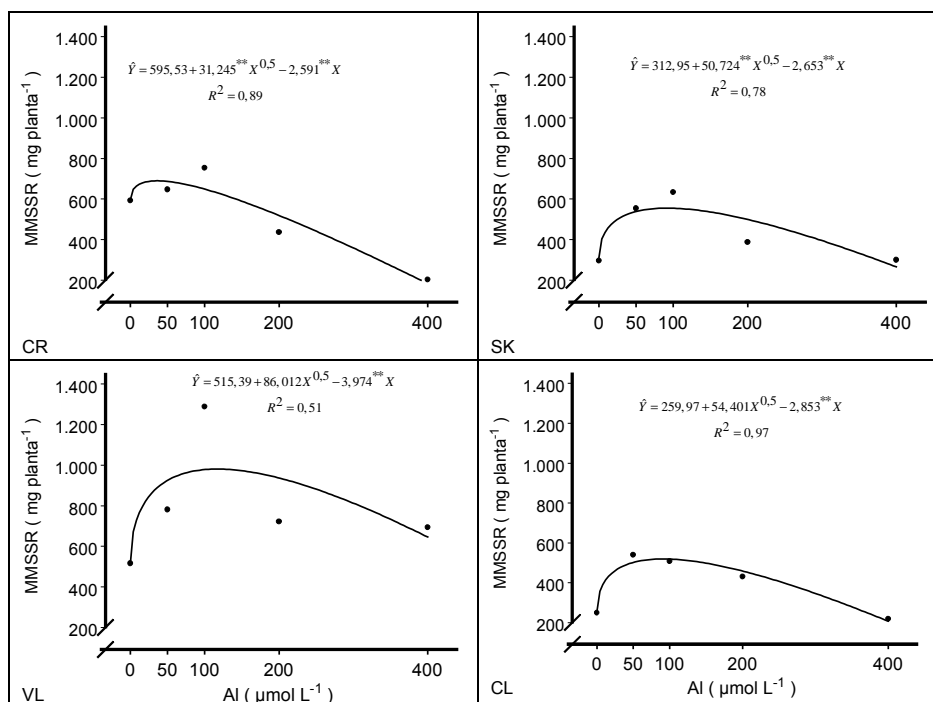
Os resultados obtidos nesta pesquisa concordam com os relatados em outros trabalhos realizados com espécies diferentes, nas quais o alumínio causou decréscimo da taxa relativa de crescimento (OLEKSYN et al., 1996; NEOGY et al., 1999). De acordo com LIN e MYHRE (1991a), a massa de matéria fresca total de vários porta-enxertos de citros submetidos a baixas concentrações de alumínio ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$) aumentou em relação à testemunha, diminuindo com o aumento da concentração de Al.

Os possíveis mecanismos que causaram o acréscimo inicial da TRC, em baixas concentrações de Al, poderiam ser os mesmos mencionados para a taxa de fotossíntese líquida (Capítulo 1). Com exceção do limoeiro 'Volkameriano', verificou-se acréscimos iniciais da taxa de fotossíntese líquida (Capítulo 1) e da TRC, o qual é um indicativo de que o acréscimo da TRC foi devido ao aumento da taxa de fotossíntese líquida.

3.2. Crescimento do sistema radicular

Para todos os porta-enxertos avaliados, a massa de matéria seca do sistema radicular aumentou na presença de baixas concentrações de alumínio, sendo os valores máximos obtidos com as doses estimadas de 36 (CR) a 117 (VL) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. No limoeiro 'Cravo', foram verificados os menores aumentos percentuais. Na ausência de Al, os maiores valores absolutos foram verificados nos dois limoeiros (Figura 3).

Em valores relativos, considerando a média nas cinco doses de Al, a maior inibição do acúmulo de matéria seca foi verificada no limoeiro 'Cravo'. Em comparação às duas tangerineiras, os limoeiros sofreram maior inibição, porém, essa diferença foi devida ao limoeiro CR (Quadros 1 e 2).



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 3 – Estimativa da massa de matéria seca do sistema radicular (MMSSR) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

NOGUEIRA et al. (1989) não verificaram efeito do Al na massa de matéria seca do sistema radicular do limoeiro 'Volkameriano' nas concentrações de alumínio testadas (0 a 2.222 $\mu\text{mol L}^{-1}$). Porém, na concentração de 555 $\mu\text{mol L}^{-1}$, verificaram aumento, em relação à testemunha, de 51% e de 8% na 'Sunki' e no 'Cravo', respectivamente, ocorrendo decréscimo nas maiores concentrações. De forma semelhante aos resultados obtidos neste experimento, os autores acima mencionados verificaram também maior sensibilidade do limoeiro 'Cravo' ao Al.

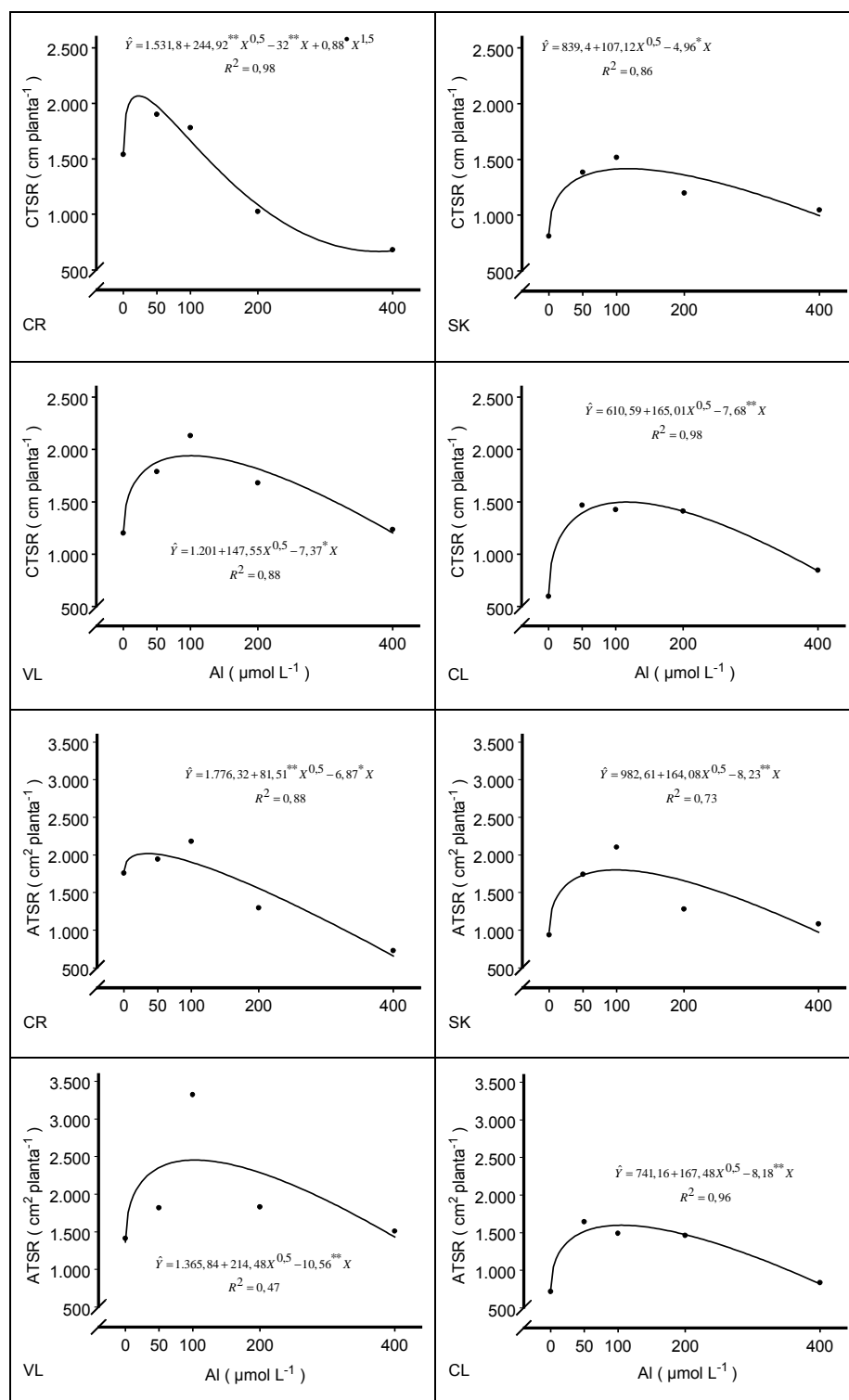
PINTO (1999) verificou que a massa de matéria seca do sistema radicular de mudas do limoeiro 'Volkameriano' crescidas na concentração de 370 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al apresentou acréscimos de até 169%, em comparação às mudas crescidas na ausência de Al na solução nutritiva.

Em porta-enxertos de videira submetidos ao alumínio, foi verificado também acréscimo da massa de matéria seca do sistema radicular em comparação ao controle (FRÁGUAS et al., 1989; FRÁGUAS, 1999). Portanto, a massa de matéria seca do sistema radicular é uma característica que, na maioria das situações, não seria a mais adequada para a avaliação do grau de tolerância ao alumínio.

O comprimento e a área total do sistema radicular aumentaram até certa concentração de Al, atingindo o máximo crescimento com o valor estimado de 23 (CR) a 103 (VL) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (Figura 4).

Em valores relativos, o limoeiro 'Cravo' teve o comprimento e a área total do sistema radicular mais afetado pelo alumínio. Considerando a comprimento total, a tangerineira 'Sunki' teve maior inibição em comparação à 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2).

De forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa, CLUNE e COPELAND (1999) observaram máximo crescimento de raízes de canola na presença de 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva, devido ao aumento do tamanho e do número de células; com maiores concentrações, houve inibição do crescimento radicular.



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 4 – Estimativa do comprimento (CTSR) e da área total (ATSR) do sistema radicular dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Segundo SANTOS et al. (1999a), o comprimento do sistema radicular em mudas de limoeiro 'Cravo' expostas a $277 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, durante 84 dias, diminuiu 21% em relação ao controle. Já no citrumeleiro 'Swingle' diminuiu 49%.

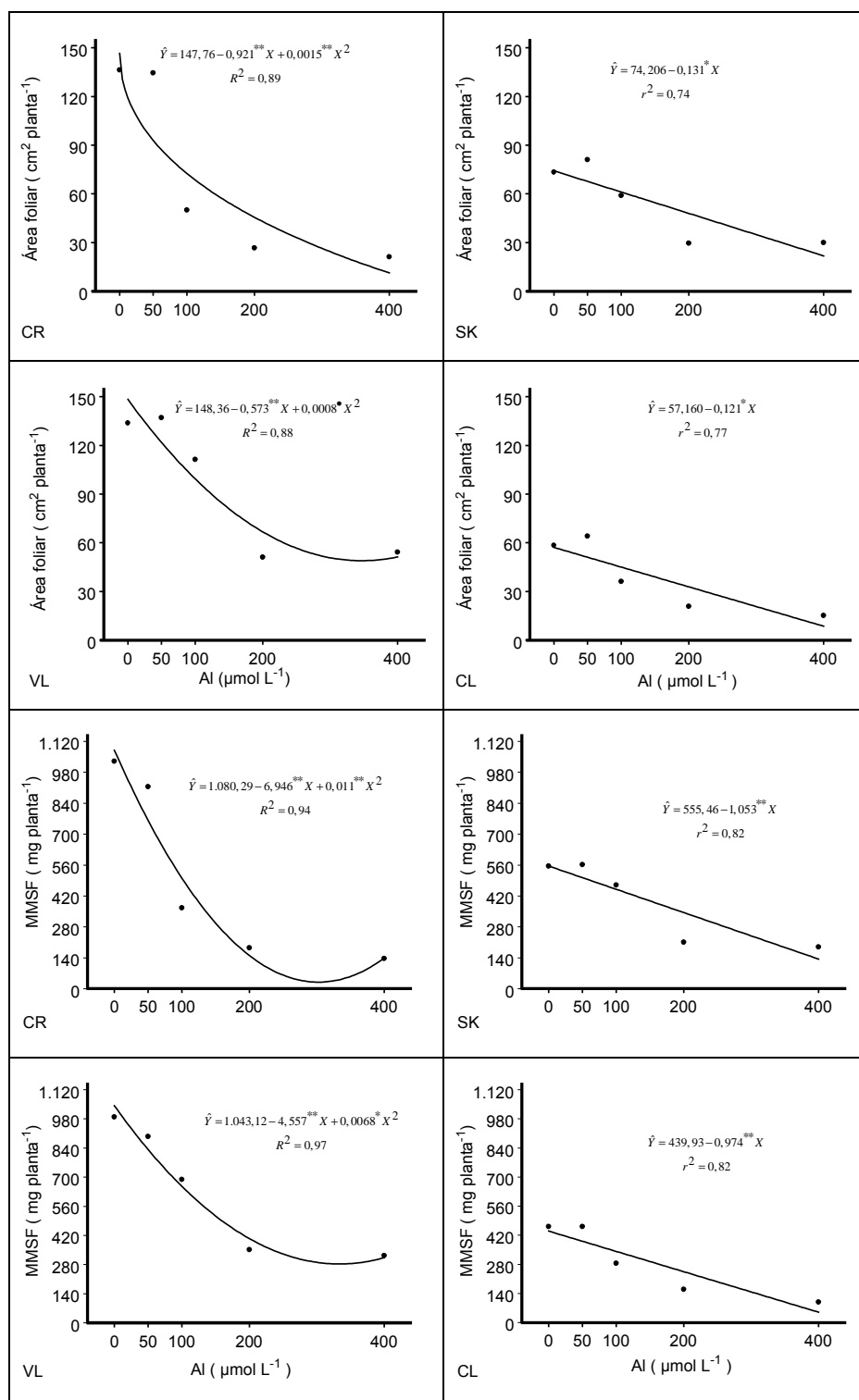
Com exceção do limoeiro 'Cravo', os valores das três características (MMSSR, CTSR e ATSR) avaliadas, até a concentração de $400 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al foram maiores que os obtidos na ausência do alumínio na solução nutritiva (Figuras 3 e 4), o que aparentemente indicaria efeitos benéficos do alumínio sobre a funcionalidade do sistema radicular como responsável pela absorção de água e de nutrientes. Porém, essa absorção ocorre principalmente nos pêlos absorventes das raízes laterais (KOWLOSKI e PALLARDI, 1997), cuja quantidade aumentou somente até $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ de alumínio. Com maiores concentrações, verificou-se engrossamento dos segmentos radiculares e diminuição gradual da quantidade de raízes laterais, e conseqüentemente, de pêlos absorventes.

3.3. Crescimento da parte aérea

A área foliar e a massa de matéria seca das folhas (MMSF) diminuíram na presença de alumínio na solução nutritiva em todos os porta-enxertos avaliados (Figura 5). Em valores relativos, o maior decréscimo foi observado no limoeiro 'Cravo' (Quadros 1 e 2), não sendo detectadas diferenças entre as tangerineiras. Devido ao maior decréscimo da MMSF verificado no 'Cravo', o valor relativo médio dos limoeiros foi significativamente menor em comparação com as tangerineiras.

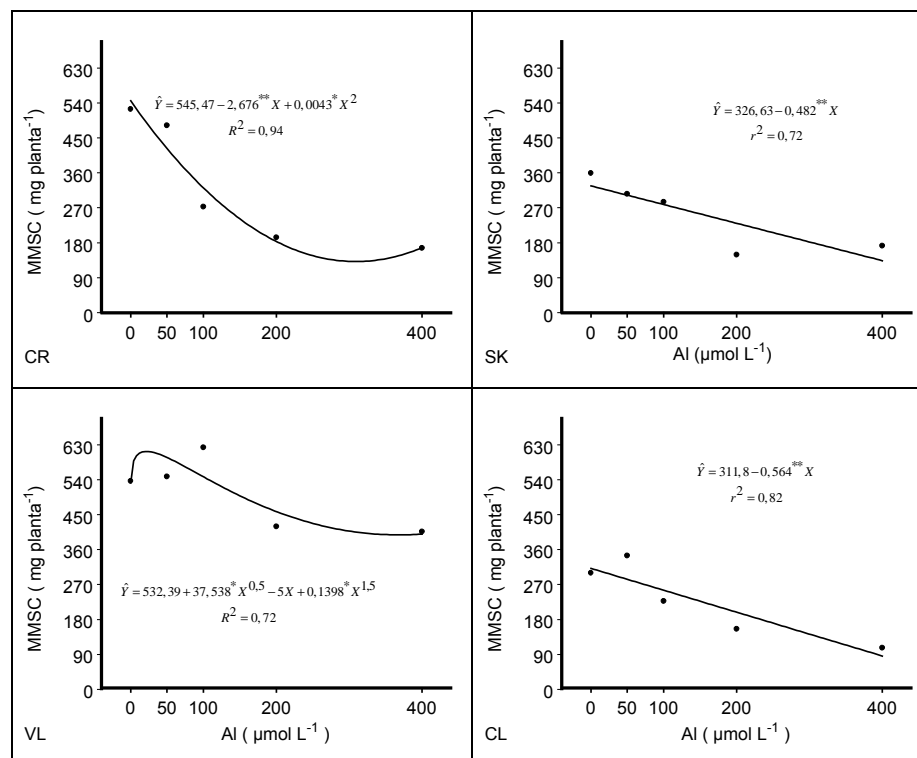
No limoeiro 'Volkameriano', a massa de matéria seca do caule aumentou até a concentração estimada de $37 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (Figura 6). Nos demais porta-enxertos, houve decréscimo dessa característica, mesmo na presença de baixas concentrações de Al.

De forma semelhante às duas características anteriores, a maior diminuição foi verificada também no limoeiro 'Cravo' (Quadros 1 e 2).



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 5 – Estimativa da área foliar e da massa de matéria seca foliar (MMSF) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.



*, ** = Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 6 – Estimativa da massa de matéria seca do caule (MMSC) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Os efeitos negativos do alumínio sobre o crescimento da parte aérea das plantas têm sido relatados em vários trabalhos publicados (ZAIFNEJAD et al. 1997; BRACCINI et al. 1998; MENDONÇA et al. 1999).

Efeitos semelhantes aos observados nesta pesquisa foram verificados em diversos porta-enxertos de citros avaliados por vários autores. Por exemplo, de acordo com NOGUEIRA et al. (1989), a massa de matéria seca foliar dos limoeiros ‘Volkameriano’ e ‘Cravo’ e da tangerineira ‘Sunki’ decresceu linearmente com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, sendo verificadas, na maior concentração avaliada, diminuições de 63%, 58% e 41%, respectivamente, em relação à testemunha.

VASCONCELLOS et al. (1989) verificaram decréscimos lineares das massas de matéria seca dos caules e das folhas em mudas de limoeiro ‘Cravo’ e de tangerineira ‘Cleópatra’, submetidas ao alumínio no solo utilizado

como substrato. De acordo com SANTOS et al. (1999a), a área foliar, a massa de matéria seca dos caules e das folhas do limoeiro 'Cravo', diminuíram de 19% a 23% na presença do alumínio.

O alumínio, além de diminuir a taxa fotossintética (Capítulo 1), causou decréscimo da área foliar, havendo menor produção de fotoassimilados utilizados para o crescimento da planta. Desta forma, houve menor crescimento dos porta-enxertos, principalmente da parte aérea.

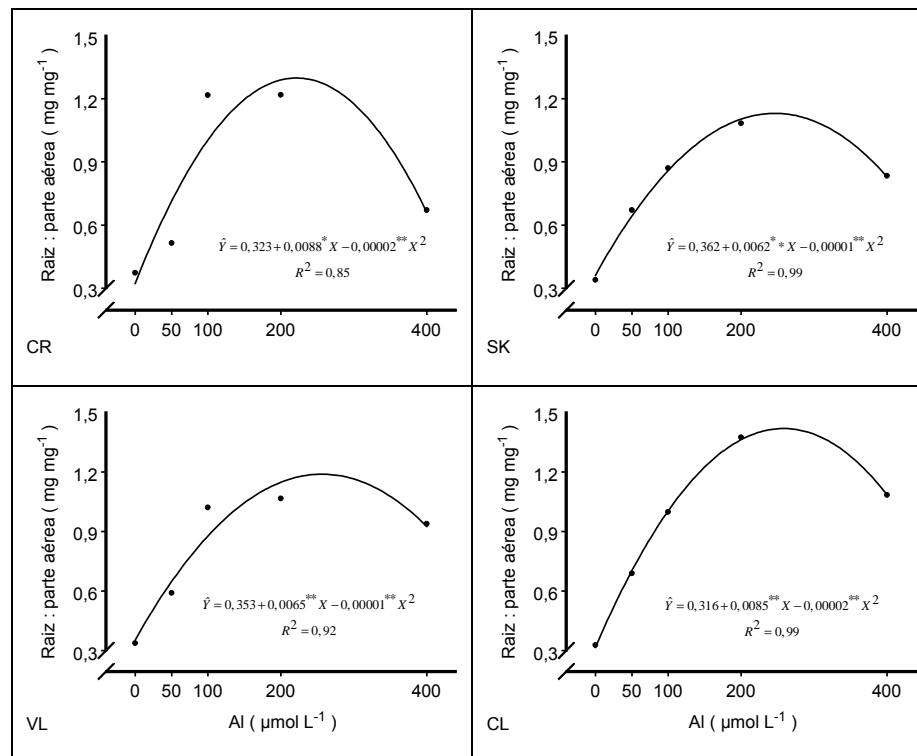
3.4. Relação raiz parte aérea (RRPA)

A relação entre a massa de matéria seca do sistema radicular e da parte aérea em todos os porta-enxertos, atingiu valores máximos ($1,3 \text{ mg mg}^{-1}$) na concentração estimada de $235 \text{ a } 260 \mu\text{mol L}^{-1}$ de alumínio (Figura 7).

O maior acréscimo percentual foi verificado na tangerineira 'Cleópatra', não sendo detectadas diferenças entre os dois limoeiros. Comparando as duas tangerineiras com os dois limoeiros, verificou-se maior acréscimo nas tangerineiras, o que foi devido à 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2).

Em mudas de *Prunus cerasus* verificou-se aumento de 188% da RRPA quando cresceram em solução contendo $2.222 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo com maiores concentrações (BORKOWSKA, 1991). Efeitos semelhantes foram verificados em plantas de sorgo que cresceram em solução nutritiva contendo $100 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (HODSON e SANGSTER, 1993).

De acordo com os dados apresentados por PINTO (1999), é possível verificar também que a concentração de $370 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva, provocou aumento da RRPA em vários porta-enxertos de citros. Por outro lado, de acordo com os dados apresentados por SANTOS et al. (1999a), a presença do alumínio não alterou essa característica, tanto no limoeiro 'Cravo' como no citrumeleiro 'Swingle'.



*, ** = Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 7 – Estimativa da relação raiz parte aérea dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

De acordo com JACKSON (1993), o crescimento e o comportamento da parte aérea estão estreitamente relacionados com o crescimento e o comportamento do sistema radicular, refletida na relação raiz parte aérea com base na massa de matéria seca, o qual implica a existência de mecanismos que regulam o crescimento da parte aérea e do sistema radicular. Alguns desses mecanismos poderiam ser o suprimento de água e de minerais por parte do sistema radicular para a parte aérea, além da síntese e do transporte de reguladores de crescimento entre o sistema radicular e a parte aérea.

O aumento da RRPV verificado neste experimento, foi devido a que o Al diminuiu a massa de matéria seca foliar (Figura 5) e, provocou aumento da massa de matéria seca do sistema radicular em três dos porta-enxertos avaliados (Figura 3). Isso indica que em condições de estresse, as plantas

avaliadas alocaram maior quantidade de fotoassimilados para o sistema radicular, em detrimento da parte aérea.

De acordo com o modelo quantitativo da relação raiz parte aérea THORNLEY (1972), as deficiências de nutrientes, principalmente de N e de P, aumentam a alocação de fotoassimilados para o sistema radicular. Segundo MARSCHNER et al. (1996), esse fato depende da translocação de nutrientes da parte aérea para o sistema radicular.

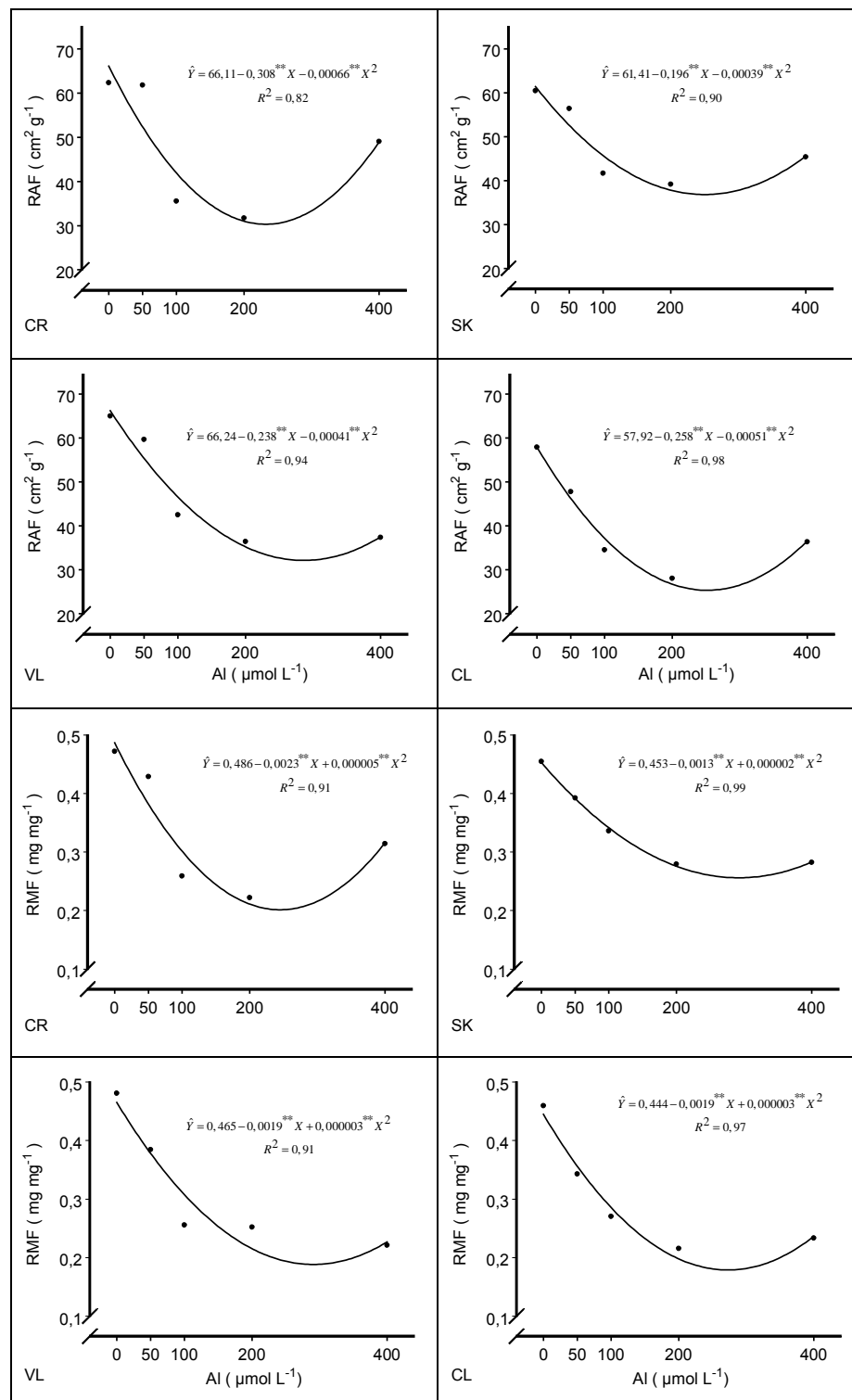
Neste experimento foi verificado significativo decréscimo do teor de P na parte aérea de todos os porta-enxertos (Capítulo 3), podendo ter sido esse um dos motivos do aumento da RRPA. Efeitos semelhantes da deficiência de P sobre essa relação em plantas de soja, foram verificados por FREEDEN et al. (1989).

3.5. Relação de área foliar (RAF) e de massa foliar (RMF)

Em todos os porta-enxertos avaliados, tanto a relação de área foliar (RAF) como a de massa foliar (RMF) inicialmente diminuíram até a concentração de 245 (CR) a 292 (SK) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva, ocorrendo aumento dessas características na presença de maiores concentrações de Al (Figura 8).

Em valores relativos, o menor decréscimo foi verificado na tangerineira 'Sunki' em comparação à 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2). No 'Volkameriano' houve maior decréscimo da RMF em comparação ao 'Cravo'.

A RAF é um índice morfológico da "folhosidade" da planta, que permite conhecer o balanço entre os componentes potencialmente fotossintetizante e respirante da planta (HUNT, 1990). A RMF mede a "folhosidade" da planta com base na matéria seca, permitindo conhecer a capacidade potencial da planta de suportar a massa de matéria seca existente, assim como de aumentá-la mediante a fotossíntese (BEADLE, 1993). Por tanto, neste experimento, o Al afetou negativamente a capacidade de todos os porta-enxertos de manter e,



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 8 – Estimativa da relação de área foliar (RAF) e de massa foliar (RMF) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

ou aumentar a matéria seca existente, aumentando o componente potencialmente respirante da planta.

De forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa, muitos pesquisadores observaram, em várias espécies expostas a condições de estresse, decréscimo da RAF. Por exemplo, WAHID et al. (1998) em plantas de girassol expostas a salinidade; CHEN et al. (1999) em plantas de *Solanum muricatum* expostas a salinidade; MINOTTA e PINZAUTI (1996) em mudas de *Fagus sylvatica* sob condições de estresse luminoso.

Com base nos dados apresentados por PINTO (1999), em mudas de limoeiro 'Cravo' expostas a $370 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, verificou-se decréscimo de 27% da RAF, enquanto que em mudas de tangerineira 'Cleópatra' o decréscimo foi de 15%. Por outro lado, com base nos dados de SANTOS et al. (1999a), não foi verificado efeito do alumínio sobre a RAF em dois porta-enxertos de citros avaliados.

Em muitos casos, a RMF também diminui sob condições de estresse. Por exemplo, em plantas de soja pulverizadas com herbicidas (MARENCO e LOPES, 1998); em plantas de *Vigna* expostas a alagamento (TAKELE e McDAVID, 1994); em plantas de *Betula pendula* submetidas a deficiência de Mn (GORANSSON, 1994); em plantas de milho expostas a salinidade (CRAMER et al., 1994).

De acordo com os dados apresentados por PINTO (1999), em mudas de limoeiro 'Cravo' e de tangerineira 'Cleópatra' expostas a $370 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, verificou-se decréscimo de 17,4% e de 18,2 da RMF, respectivamente.

Com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, houve decréscimo da área e da massa de matéria seca foliar em todos os porta-enxertos (Figura 6). Isso provocou diminuição da RAF e da RMF, visto que a massa de matéria seca total foi menos afetada, devido ao aumento da massa de matéria seca radicular em três (CR, SK e CL) dos porta-enxertos avaliados (Figura 3).

3.6. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais, aplicada na matriz de correlações dos valores relativos das características do crescimento, permitiu identificar dois componentes principais, que representam 94% da variância total das características originais (Quadro 3).

O primeiro componente representa o crescimento relativo geral da planta. O segundo componente principal representa um contraste entre o crescimento relativo da parte aérea contra o crescimento relativo do sistema radicular (Quadro 3). Portanto, se determinado porta-enxerto apresenta escores maiores em relação a outro, será por que apresenta maiores valores relativos de crescimento do sistema radicular.

De acordo com a classificação baseada nos escores dos dois primeiros componentes principais, verifica-se que, considerando todas as características relacionadas com o crescimento, o limoeiro 'Cravo' foi o porta-enxerto mais sensível ao alumínio (Figura 9). Por outro lado, a tangerineira 'Cleópatra' apresentou maior tolerância ao alumínio.

Esses resultados coincidem com os reportados por LIN e MYHRE (1991a) e PINTO (1999), que consideram à tangerineira 'Cleópatra' como um dos porta-enxertos cítricos mais tolerantes ao alumínio.

As diferenças de comportamento dos porta-enxertos avaliados ao estresse por alumínio, podem ser devidas à expressão diferencial de um ou mais mecanismos de exclusão ou de tolerância interna ao alumínio, descritas por TAYLOR (1991, 1995) e KOCHIAN (1995).

A classificação dos porta-enxertos 'Cravo' e 'Cleópatra' em relação à tolerância ao alumínio, baseada nas características do crescimento, coincide com a classificação baseada nas características das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila *a* (Capítulo 1). Como estas duas técnicas são relativamente fáceis e rápidas para serem utilizadas, além de não destruírem as plantas, podem ser recomendadas para a avaliação do grau de tolerância de porta-enxertos de citros ao alumínio.

Quadro 3 – Autovetores em dois componentes principais (CP1 e CP2) dos valores em relação à testemunha, da massa de matéria seca do sistema radicular (**MMSSR**); da área total do sistema radicular (**ATSR**); do comprimento total do sistema radicular (**CTSR**); da área foliar (**AF**); da massa de matéria seca das folhas (**MMSF**); da massa de matéria seca dos caules (**MMSC**) e da taxa de crescimento relativo da massa de matéria fresca total (**TRC**) de quatro porta-enxertos cítricos submetidos a estresse por alumínio

Característica	CP1	CP2
MMSSR	0,38	0,37
ATSR	0,36	0,44
CTSR	0,33	0,47
AF	0,38	<u>-0,40</u>
MMSF	0,37	<u>-0,41</u>
MMSC	0,38	<u>-0,33</u>
TRC	0,44	-0,04
λ	4,65	1,92
VAC (%)	66	94

λ = Autovalor da matriz de correlação.
VAC = variância acumulada.

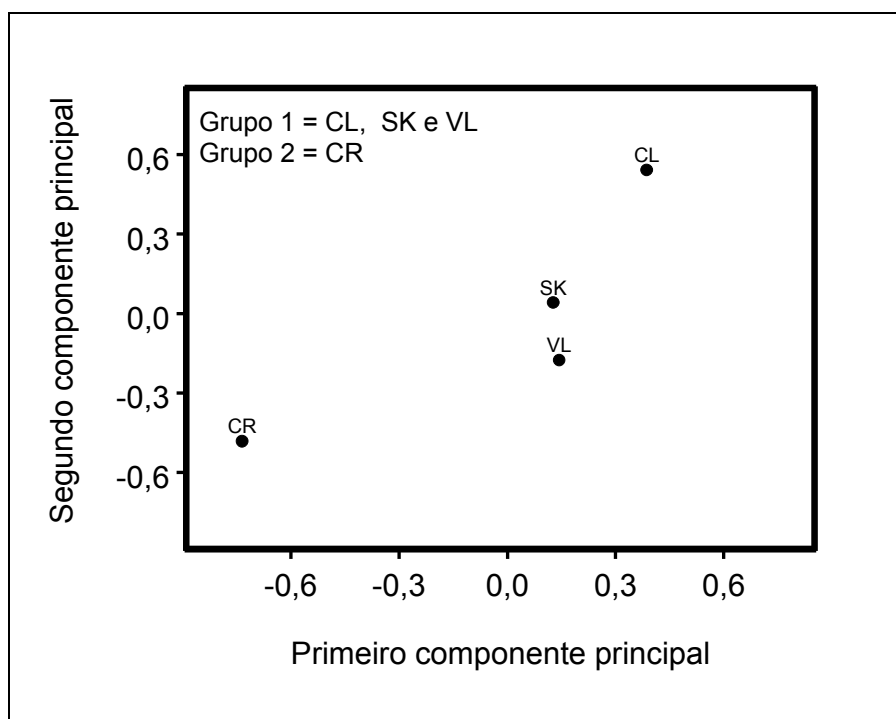


Figura 9 – Agrupamento dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), baseado nos escores do primeiro e do segundo componente principal.

4. CONCLUSÕES

Em todos os porta-enxertos, a taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca de toda a planta aumentou inicialmente na presença de baixas concentrações de alumínio na solução nutritiva (15 a 35 $\mu\text{mol L}^{-1}$), decrescendo na presença de maiores concentrações.

No limoeiro 'Cravo' verificou-se decréscimo do crescimento do sistema radicular a partir de 23 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de alumínio. Nos demais porta-enxertos, houve aumento do crescimento na presença do alumínio, atingindo valores máximos na presença de 91 a 117 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo com maiores concentrações, porém, sem atingir valores menores em comparação à testemunha.

O crescimento da parte aérea diminuiu em todos os porta-enxertos na presença do alumínio, verificando-se no limoeiro 'Cravo' o maior decréscimo.

A relação raiz parte aérea, com base na massa de matéria seca, aumentou em função da concentração de alumínio, em todos os porta-enxertos avaliados.

Na presença do alumínio, houve menor alocação de fotoassimilados para as folhas, evidenciado pelo decréscimo da relação de área foliar (RAF) e da relação de massa foliar (RMF) em todos os porta-enxertos.

Considerando todas as características relacionadas com o crescimento, o porta-enxerto mais tolerante ao alumínio foi a tangerineira 'Cleópatra', enquanto que o limoeiro 'Cravo' foi o mais sensível.

CAPÍTULO 3

COMPOSIÇÃO MINERAL DE QUATRO PORTA-ENXERTOS DE CITROS SUBMETIDOS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO, EM CULTIVO HIDROPÔNICO

1. INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de nutrientes, concomitantemente com a inibição da sua absorção, são considerados os principais impedimentos para o crescimento das plantas nos solos ácidos, com teores elevados de alumínio.

O alumínio afeta a estrutura e a permeabilidade das membranas (ZHAO et al. 1987; CHEN et al. 1991), e a subsequente alteração dos processos de transporte pode limitar severamente a absorção de nutrientes pelo sistema radicular (FOY et al., 1978).

As mudanças estruturais e funcionais do sistema radicular, provocadas pelo alumínio, resultam em decréscimo do crescimento e em deficiências de nutrientes na parte aérea das plantas (FOY, 1988). O alumínio diminui a absorção de nutrientes devido ao decréscimo da área absorptiva do sistema radicular, à alteração da integridade estrutural e da permeabilidade das membranas, além da interferência direta sobre os transportadores de íons da membrana plasmática (HUANG et al., 1992).

Plantas submetidas a estresse por alumínio podem gerar quantidades excessivas de formas reativas de oxigênio (O_2^- e H_2O_2), aumentando a peroxidação dos lipídios das membranas (CAKMAK e HORST, 1991;

YAMAMOTO et al, 2001), que altera a sua permeabilidade, o transporte de íons e a atividade de várias enzimas, principalmente a H^+ -ATPase.

O Al interfere de modo generalizado na absorção e no metabolismo nitrogenado. Em concentrações tóxicas, o Al diminui a absorção e a redução de nitrato em raízes de diversas plantas (FOY e FLEMING, 1982); diminui o transporte de nitrogênio para a parte aérea (GOMES et al, 1985) e diminui a atividade de enzimas que catalizam a redução e assimilação de nitrogênio (FOY e FLEMING, 1982). Além disso, existem evidências de que o Al possa interferir, pelo menos indiretamente, em processos de síntese e, ou degradação protéica (FOY, 1974; SOMERS et al. 1996).

O fracionamento do nitrogênio também é afetado pelo Al. CAMBRAIA et al. (1990) verificaram em plantas de sorgo, que a quantidade de N-insolúvel decresceu rapidamente com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, especialmente na parte aérea. O N-solúvel, por outro lado, foi pouco alterado, embora as formas constituintes, especialmente a nítrica e a aminoacídica, tenham variado com o teor de Al.

O alumínio provoca deficiência de fósforo na parte aérea devido à diminuição da superfície de absorção, e a complexação e precipitação com o P nas células corticais do sistema radicular (McCORMICK e BORDEN, 1974). Em plantas de *Lupinus*, a presença de alumínio na solução nutritiva durante 33 dias causou decréscimo do teor de fósforo na matéria seca da parte aérea, diminuindo de 0,29 dag kg^{-1} na testemunha para 0,01 dag kg^{-1} (RHEINHEIMER et al., 1992).

FURLANI e FURLANI (1991) verificaram, em 100 linhagens de milho e de arroz, que os índices de utilização de P e de tolerância ao Al são características independentes, apresentando baixos coeficientes de correlação.

Em genótipos de trigo submetidos a estresse por alumínio, BERNAL e CLARK (1997) verificaram decréscimo do teor da maioria dos nutrientes, tanto no sistema radicular como na parte aérea. Os genótipos tolerantes tiveram maior teor de Mn na parte aérea e de K no sistema radicular, menores teores de Ca no sistema radicular e na parte aérea e, menores teores de P, Mg e de Mn no sistema radicular, em comparação aos genótipos mais sensíveis ao alumínio. O teor do Al no sistema radicular aumentou até 100 vezes mais em

comparação ao teor de Al na parte aérea. A composição mineral do sistema radicular e da parte aérea dos genótipos testados não foi um critério adequado para distinguir a tolerância ao alumínio.

Em plantas de arroz (HOWELER e CADAVID, 1976), de trigo, de cevada e de tritcale (MUGWIRA et al., 1980) os teores de P, Ca, Mg e K eram maiores nos genótipos tolerantes, podendo as diferenças na distribuição desses nutrientes contribuir na seleção de genótipos.

WHEELER (1995) verificou, em várias espécies de gramíneas utilizadas como forrageiras, que o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva resultou em decréscimo do teor de Mg e de K no sistema radicular e na parte aérea. O teor de Ca na parte aérea diminuiu, enquanto o teor de P no sistema radicular aumentou. Em uma das espécies avaliadas (*Phleum pratense*), o alumínio não afetou o teor de Ca e de K na parte aérea.

Nas raízes de *Picea abies* submetidas a 100 ou 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al foi verificado deslocamento do Ca e do Mg dos sítios de absorção localizados na parede celular das células radiculares (GODBOLD e JENTSCHKE, 1998).

Em uma variedade de sorgo submetida a 185 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, verificou-se decréscimo do enxofre absorvido, já em outra variedade tolerante ao alumínio, essa característica não foi afetada. A velocidade máxima de absorção do enxofre diminuiu significativamente na presença do Al nas duas variedades (BONATO et al., 2000).

De acordo com LIN e MYHRE (1991b), em mudas de cinco porta-enxertos de citros submetidas ao alumínio, os teores de Ca, de Zn, de Mn e de Fe na raiz, e de Mg e de K na parte aérea, apresentaram correlação negativa com o teor de Al na raiz ou na parte aérea correspondente.

Em duas variedades de trigo, MOUSTAKAS et al. (1995) verificaram decréscimo do teor de Fe no sistema radicular e na parte aérea com o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva, sendo observado a maior diminuição (60%) no sistema radicular.

FOY et al. (1993) verificaram em genótipos de soja tolerantes ao alumínio menores teores foliares de alumínio e de ferro em comparação aos genótipos mais sensíveis.

As alterações provocadas pelo alumínio na absorção e no transporte de nutrientes, têm influência significativa nos processos fotossintéticos e no crescimento da planta. Desta forma, é importante determinar como o alumínio afeta a composição mineral do sistema radicular e da parte aérea das plantas.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos do alumínio sobre a composição mineral do sistema radicular e da parte aérea de quatro porta-enxertos de citros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os itens do Material e Métodos deste capítulo foram os mesmos apresentados no Capítulo 1 (itens 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, e 2.6). Todavia, em seqüência, o material vegetal foi lavado com água deionizada e, após a determinação da massa de matéria seca, foram determinados os teores de N-orgânico, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn e Al no sistema radicular e na parte aérea (folhas+caules) dos porta-enxertos.

Com o objetivo de realizar a determinação dos elementos na matéria seca, o material vegetal foi secado, até peso constante, em estufa de circulação forçada a 70°C e moído em moinho tipo Wiley com peneira de 20 Mesh. Após a digestão sulfúrica, o N-orgânico foi dosado pelo método de Nessler.

Para a determinação dos demais elementos, foi utilizada digestão nítrico-perclórica, sendo o P dosado em espectrofotômetro pelo método da vitamina C, modificado por BRAGA e DEFELIPO (1974). O K foi dosado em fotômetro de chama; o Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn e Al em espectrofotômetro UV-visível de absorção atômica. O S foi dosado por turbidimetria.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

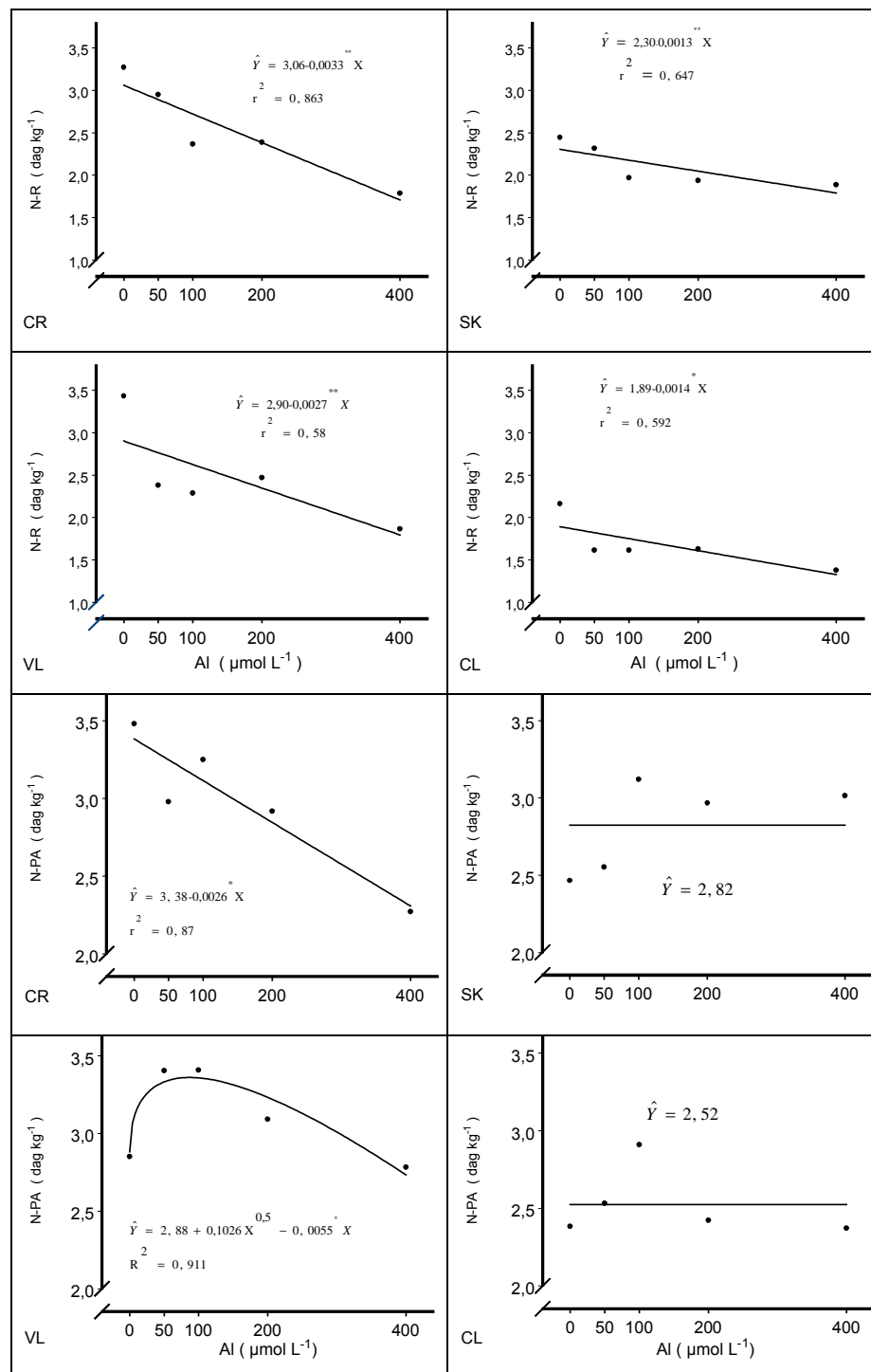
3.1 Macronutrientes

3.1.1. Nitrogênio

O teor de N-orgânico no sistema radicular decresceu na presença do alumínio, em todos os porta-enxertos (Figura 1). Considerando a média dos valores relativos, houve maior diminuição do teor na tangerineira 'Cleópatra' em comparação com a 'Sunki'. Nos limoeiros, principalmente no 'Volkameriano', houve maior decréscimo em comparação às tangerineiras (Quadros 1 e 2).

No limoeiro 'Cravo', o alumínio causou decréscimo linear do teor de N-orgânico na parte aérea (Figura 1). Já no 'Volkameriano', houve aumento desse teor até a concentração estimada de $64 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo com maiores concentrações, porém, sem atingir valores menores aos obtidos na ausência do alumínio. Nas duas tangerineiras, não foram verificados efeitos significativos do Al. Na ausência de alumínio, os limoeiros apresentaram maior teor de N-orgânico em comparação às tangerineiras, de forma semelhante aos resultados obtidos por DECARLOS NETO (2000). Em valores relativos, a maior diminuição verificou-se no limoeiro 'Cravo' (Quadros 1 e 2).

As plantas cítricas absorvem o nitrogênio tanto na forma de nitrato como de amônio. KATO (1980) verificou em tangerineiras 'Satsuma' adubadas com



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 1 – Estimativa do teor de N-orgânico no sistema radicular (N-R) e na parte aérea (N-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Quadro 1 – Média (%) dos valores relativos à testemunha, nas cinco doses de alumínio, do teor na raiz (-R) ou na parte aérea (-PA) de nitrogênio-orgânico (**N**), de fósforo (**P**), de potássio (**K**), de cálcio (**Ca**), de magnésio (**Mg**), de enxofre (**S**), de cobre (**Cu**), de ferro (**Fe**), de manganês (**Mn**), de zinco (**Zn**) e de alumínio (**Al**), dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Característica	Porta-enxertos			
	CR	SK	VL	CL
N-R	78,0	86,3	72,5	77,7
N-PA	85,6	114,5	109,0	105,9
P-R	55,1	69,0	65,8	71,1
P-PA	42,8	67,6	58,3	63,4
K-R	66,4	83,7	128,7	81,6
K-PA	87,3	93,9	56,7	92,7
Ca-R	65,9	96,9	80,2	89,3
Ca-PA	83,1	114,4	96,4	79,8
Mg-R	60,1	70,1	65,6	68,2
Mg-PA	178,6	166,8	181,8	145,6
S-R	46,7	59,5	64,0	54,6
S-PA	69,7	72,2	80,9	55,5
Cu-R	52,2	71,5	74,8	52,6
Cu-PA	68,7	97,7	86,0	67,1
Fe-R	69,3	83,4	101,8	78,9
Fe-PA	66,5	145,9	100,5	84,0
Mn-R	60,9	57,1	70,4	53,6
Mn-PA	72,9	97,8	113,4	80,8
Zn-R	66,3	80,3	57,6	57,4
Zn-PA	100,9	137,5	149,9	105,5
Al-R	1.035,2	1.741,4	748,0	2.171,6
Al-PA	300,0	304,7	279,7	196,3

(NH₄)₂SO₄ e KNO₃, abundante absorção dessas duas formas de N pelas raízes finas.

A inibição da absorção de nitrato pela presença do alumínio tem sido verificada em várias espécies de plantas, como no sorgo (GOMES et al., 1985), no *Trifolium repens* (JARVIS e HATCH, 1986) e na soja (LAZOF et al., 1994). Por outro lado, NICHOL et al. (1993) verificaram, em plantas de sorgo, que 100 µmol L⁻¹ de Al aumentou o influxo de nitrato e inibiu o influxo de amônio. Esses resultados contrastantes podem ser devido a que os efeitos do

Quadro 2 – Estimativa do contraste dos valores relativos (%) à testemunha, nas cinco doses de alumínio, do teor na raiz (-R) ou na parte aérea (-PA) de nitrogênio-orgânico (**N**), de fósforo (**P**), de potássio (**K**), de cálcio (**Ca**), de magnésio (**Mg**), de enxofre (**S**), de cobre (**Cu**), de ferro (**Fe**), de manganês (**Mn**), de zinco (**Zn**) e de alumínio (**Al**), dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL)

Características	Contrastes		
	CR vs VL	SK vs CL	LIM. vs TAN.
N-R	5,5	8,6 *	-6,8 *
N-PA	-23,4 **	8,6	-12,9 **
P-R	-10,7	-2,0	-9,6 *
P-PA	-15,5 *	4,2	-14,9 **
K-R	-62,3 **	2,1	14,8
K-PA	30,6 **	1,2	-21,4 **
Ca-R	-14,3 *	7,6	-20,1 **
Ca-PA	-13,3	34,6 **	-7,3
Mg-R	-5,5	1,8	-6,2
Mg-PA	-3,2	21,2	24,0 *
S-R	-17,3 **	4,9	-1,7
S-PA	-11,2	16,7 *	11,5 *
Cu-R	-22,5 **	18,9 **	1,5
Cu-PA	-17,3	30,6 *	-5,0
Fe-R	-32,4 **	4,5	4,4
Fe-PA	-34,0	61,8 **	-31,5 *
Mn-R	-9,5	3,5	10,4 *
Mn-PA	-40,5 *	17,0	3,8
Zn-R	8,7	22,9 **	-6,9
Zn-PA	-49,0 **	32,0 *	4,0
Al-R	287,2 *	-430,2 **	-1.064,8 **
Al-PA	20,3	108,4 *	39,4

Lim. = Limoeiros ; Tan. = Tangerineiras.

*, ** : significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Al sobre a absorção do nitrato dependem, dentre outros fatores, da concentração utilizada e das diferenças entre as espécies (RUFTY et al., 1995).

Resultados semelhantes aos verificados nesta pesquisa, foram reportados em outros trabalhos realizados com porta-enxertos de citros. NOGUEIRA et al. (1989) verificaram diminuição do teor de N-orgânico no sistema radicular de quatro porta-enxertos, quando estes cresceram em

solução nutritiva contendo alumínio. Na parte aérea, não detectaram influência do alumínio sobre essa característica.

SANTOS et al. (1999b) verificaram em limoeiro 'Cravo' que o alumínio causou decréscimo de até 29% do teor de N na parte aérea. Em citrumeleiro 'Swingle', observaram decréscimos de 67% na parte aérea, e de 27% no sistema radicular

CAMBRAIA et al. (1989) verificaram que o Al provocou aumento do K_m da absorção de nitrato em duas variedades de sorgo, sendo esse aumento de 267% na variedade susceptível e de 42% na variedade tolerante ao Al. Portanto, é provável que neste experimento o Al tenha afetado de forma semelhante a absorção de nitrato, o qual resultou em decréscimo do teor de N-orgânico.

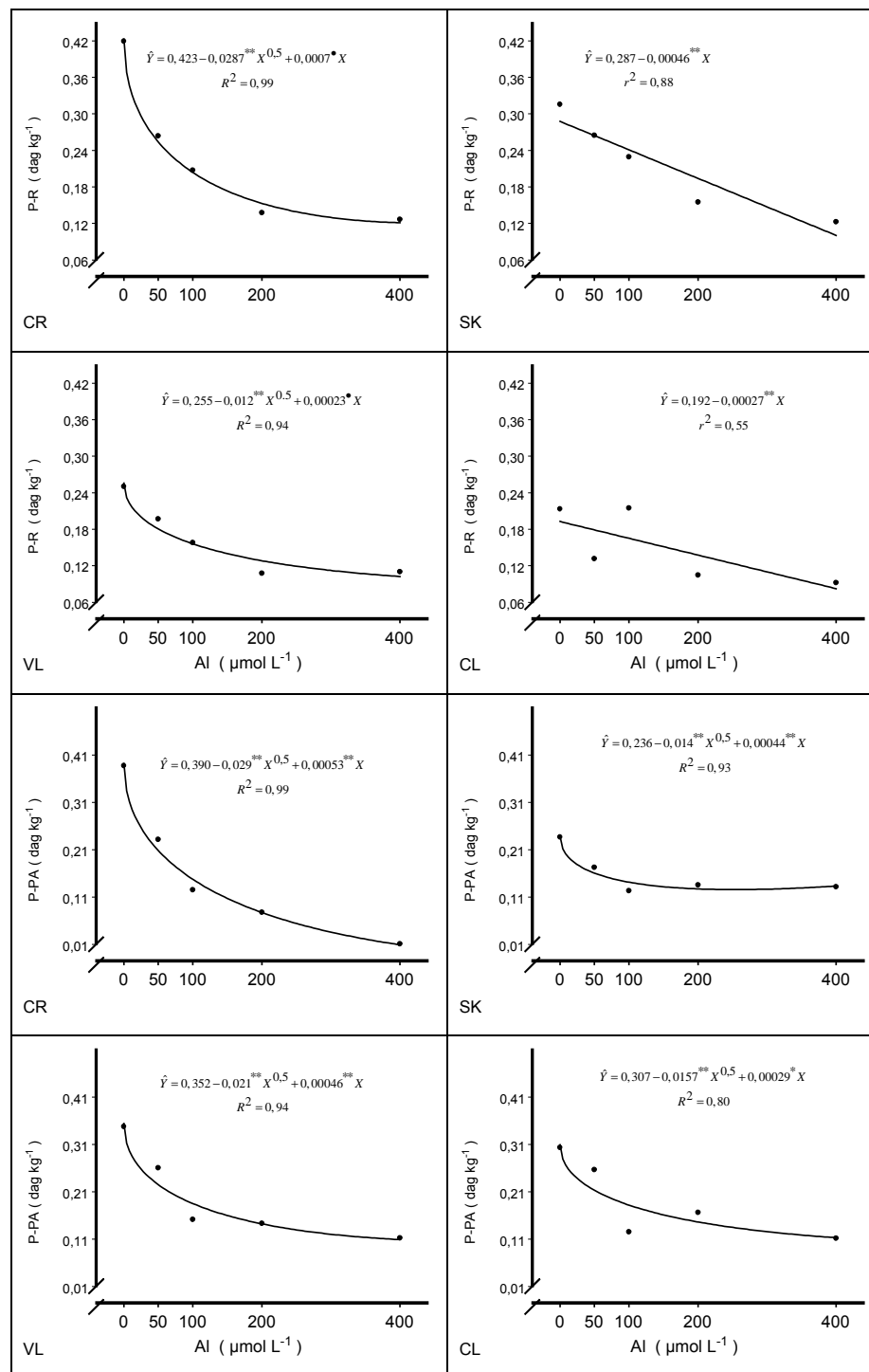
Além dos possíveis efeitos diretos do Al sobre a absorção do nitrogênio, o Al causou alterações morfológicas do sistema radicular que resultaram em menor quantidade de pêlos absorventes (Capítulo 2), fato que certamente contribuiu de forma negativa para a absorção de nitrogênio e de outros nutrientes.

Neste experimento, o limoeiro 'Cravo' foi o porta-enxerto menos tolerante ao alumínio, considerando as características da fotossíntese e do crescimento (Capítulos 1 e 2), sendo um dos prováveis motivos desse comportamento o maior decréscimo do teor de N-orgânico na parte aérea, em comparação aos outros porta-enxertos (Quadros 1 e 2).

3.1.2. Fósforo

Em todos os porta-enxertos, o teor de fósforo na matéria seca do sistema radicular (P-R) e da parte aérea (P-PA) diminuiu em função da concentração de alumínio na solução nutritiva (Figura 2). Em valores relativos, os maiores decréscimos do P-R e do P-PA foram observados no limoeiro 'Cravo', o qual causou a diferença significativa entre limoeiros e tangerineiras (Quadros 1 e 2).

Os efeitos do alumínio sobre a absorção de fósforo pelas plantas podem ser inibitórios (MUGWIRA et al., 1980) ou estimulantes (BERNAL e CLARK,



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 2 – Estimativa do teor de fósforo no sistema radicular (P-R) e na parte aérea (P-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

1997). No sistema radicular e na parte aérea de plantas de cevada, de pimentão e de *Vigna*, MALKANTHI et al. (1995) verificaram aumento do teor de fósforo na presença de $200 \mu\text{mol L}^{-1}$ de alumínio na solução nutritiva. Na parte aérea do trigo também verificaram aumento do teor de P, enquanto que no sistema radicular houve decréscimo de 42% na presença do Al.

Ao contrário dos resultados obtidos nesta pesquisa, em quatro porta-enxertos de citros avaliados em cultivo hidropônico por NOGUEIRA et al. (1989), foi verificado aumento significativo de até 25% do teor de P no sistema radicular. Na parte aérea, não verificaram efeito significativo do Al. LIN e MYHRE (1991b) verificaram, em cinco porta-enxerto de citros, aumento do teor de P no sistema radicular e na parte aérea.

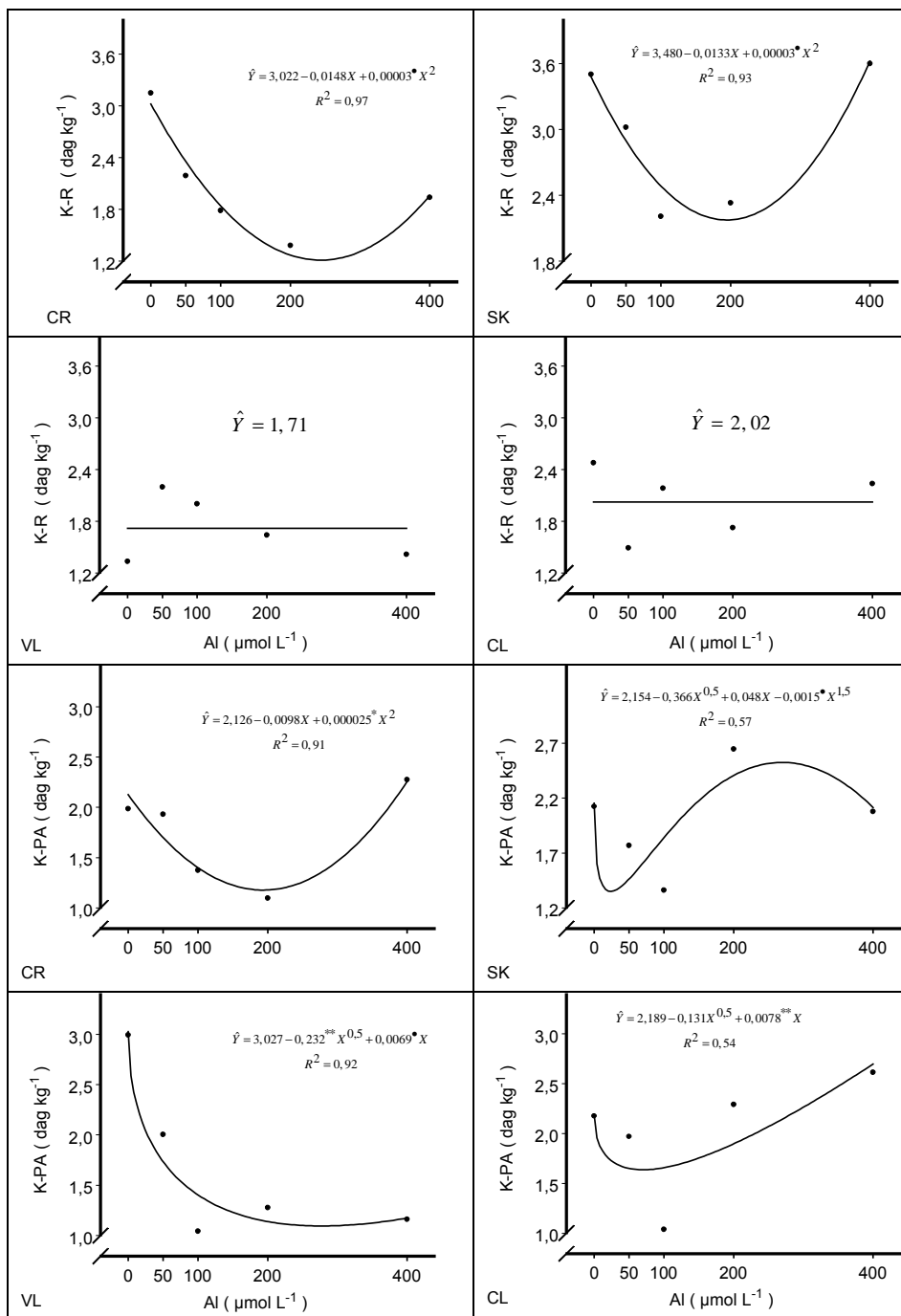
Em mudas de citrumeleiro 'Swingle' submetidas ao Al, SANTOS et al. (1999b) verificaram decréscimo do teor de P, tanto no sistema radicular como na parte aérea, de forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa.

Um dos possíveis motivos pelo qual houve diminuição da absorção de fósforo pelas plantas, foi a complexação do P pelo alumínio, ocorrida na solução nutritiva, como foi verificado por McCormick e Borden, 1972, citado por MCCORMICK e BORDEN (1974). Por outro lado, PETRY et al. (1994) verificaram, em plantas de fumo, variações nos parâmetros cinéticos de absorção do P provocadas pelo Al, sendo que o K_m aumentou de 7,8 para $34,4 \mu\text{mol L}^{-1}$ de P, indicando diminuição da eficiência de absorção do P.

No limoeiro 'Cravo', de forma semelhante ao verificado com o teor de N na parte aérea, houve maior decréscimo do teor de P na parte aérea, em comparação aos outros porta-enxertos, podendo ser outro dos motivos da sua menor tolerância ao Al (Capítulos 1 e 2).

3.1.3. Potássio

O teor de potássio na matéria seca do sistema radicular do limoeiro 'Cravo' e da tangerineira 'Sunki' teve comportamento quadrático em função da concentração de Al na solução nutritiva (Figura 3), atingindo valores mínimos com 243 e $195 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente. Nos demais porta-enxertos, não foram verificados efeitos significativos do Al. Em valores



•, ** = Significativo a 10 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 3 – Estimativa do teor de potássio no sistema radicular (K-R) e na parte aérea (K-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

relativos, o maior decréscimo foi verificado no limoeiro 'Cravo' em comparação ao 'Volkameriano' (Quadros 1 e 2).

Na parte aérea do limoeiro 'Cravo' e das duas tangerineiras, houve diminuição inicial do teor de potássio, aumentando novamente a partir de concentrações de Al que variaram de 24 (SK) a 194 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (CR) (Figura 3). No limoeiro 'Volkameriano', houve decréscimo do teor de K com o aumento da concentração de alumínio. Em valores relativos, o maior decréscimo foi observado no limoeiro 'Volkameriano' (Quadros 1 e 2).

Os efeitos do alumínio sobre a absorção de K são muito variáveis. Por exemplo, com a aplicação de até 50 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al na solução nutritiva, SIMON et al (1994a) verificaram decréscimo do teor de K na matéria seca radicular e da parte aérea em duas variedades de tomateiro. Segundo BERNAL e CLARK (1997), em 25 genótipos de sorgo, o teor de K na parte aérea não foi afetado pelas concentrações testadas de Al (até 800 $\mu\text{mol L}^{-1}$). No sistema radicular, em muitos genótipos houveram aumentos de até 25% do teor de K na concentração de 200 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo nas maiores concentrações avaliadas.

Em limoeiro 'Cravo' e em citrumeleiro 'Swingle', SANTOS et al. (1999b) verificaram decréscimos de 30% e de 20%, respectivamente, do teor de K na parte aérea na concentração de 278 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, aumentando novamente com maiores concentrações de Al. Na maior concentração avaliada de Al (1.111 $\mu\text{mol L}^{-1}$), verificaram decréscimos de 28% e de 26%, no sistema radicular dos dois porta-enxertos mencionados.

NOGUEIRA et al. (1989) verificaram aumento quadrático do teor de K nas folhas de quatro porta-enxertos de citros submetidos a estresse por alumínio. No sistema radicular, não verificaram efeito significativo do Al. Em cinco porta-enxertos de citros submetidos ao Al em solução nutritiva, LIN e MYHRE (1991b) verificaram aumento do teor de K na parte aérea e no sistema radicular, até a concentração de 100 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al.

Um possível mecanismo pelo qual o Al afetou o teor de K, pode ter sido a competição entre esses dois elementos pelos mesmos sítios de absorção na raiz, de forma semelhante ao relatado por ALAM (1983). Por outro lado, de

acordo com CAMBRAIA (1997), na membrana plasmática existem canais de efluxo e de influxo de K^+ , que são ativados pela despolarização ou pela hiperpolarização da membrana, respectivamente. O alumínio causa alterações do potencial elétrico da membrana (PAPERNIK e KOCHIAN, 1997; YERMIYAHU et al., 1997), o qual poderia ser outro dos motivos pelo qual o Al afetou o teor de K nos porta-enxertos avaliados neste experimento.

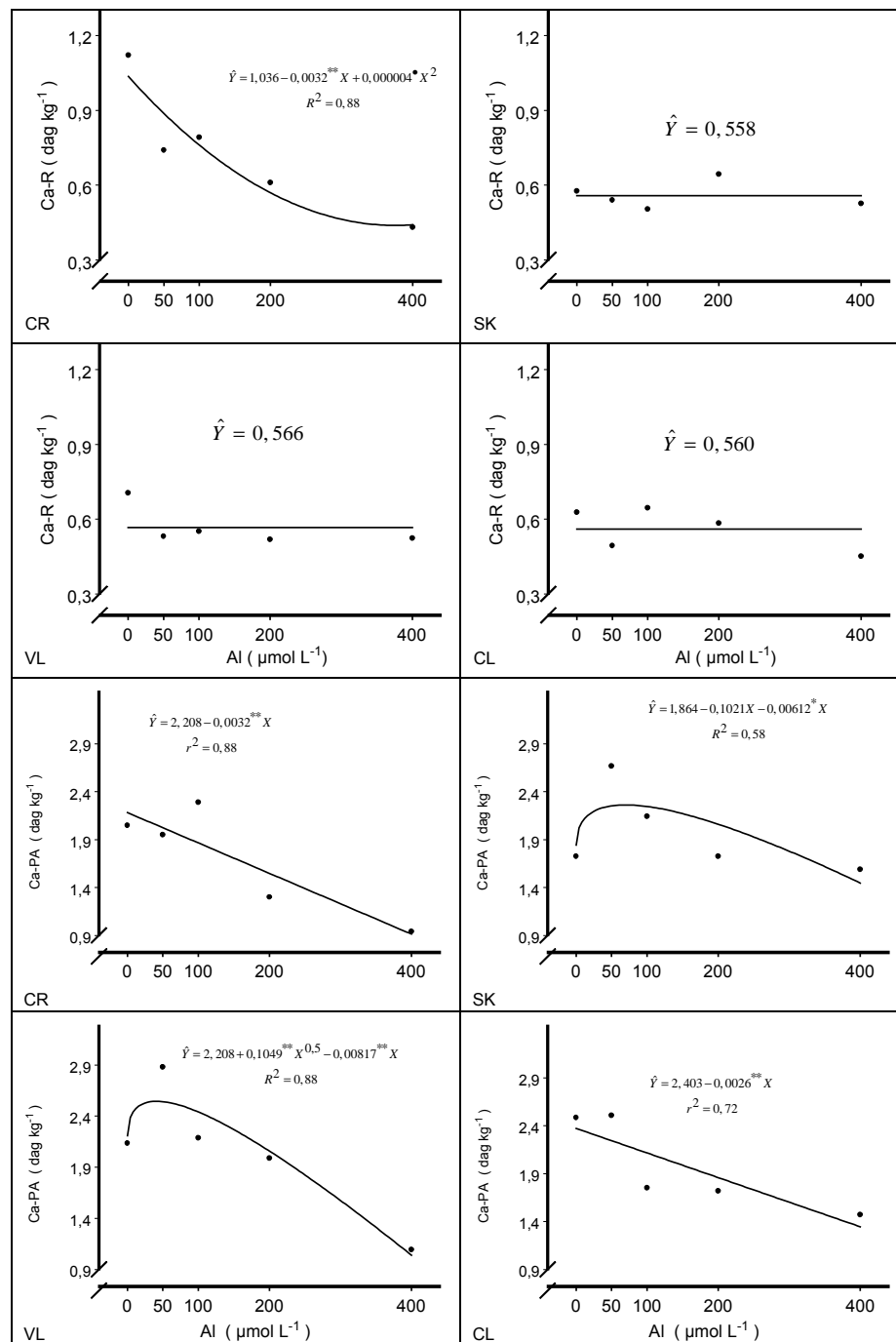
3.1.4. Cálcio

O teor de cálcio no sistema radicular do limoeiro 'Cravo' diminuiu significativamente em função da concentração de Al na solução nutritiva (Figura 4). Nos demais porta-enxertos avaliados, não foram verificados efeitos significativos do Al. Em valores relativos, a maior diminuição foi verificada no limoeiro 'Cravo', a qual causou a diferença significativa entre limoeiros e tangerineiras (Quadros 1 e 2).

Na parte aérea do limoeiro 'Cravo' e da tangerineira 'Cleópatra', o alumínio causou decréscimo linear do teor de cálcio (Figura 4). Nos outros dois porta-enxertos, houve acréscimo inicial dessa característica até a concentração estimada de 41 (VL) a 70 (SK) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, sendo verificado na tangerineira 'Sunki' o maior acréscimo. Na presença de maiores concentrações de Al, houve decréscimo do teor de Ca. Em comparação com a 'Sunki', houve maior decréscimo na 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2).

Grande proporção do cálcio nas plantas permanece no apoplasto, onde exerce papel vital para a manutenção da estrutura e da funcionalidade das membranas. O Al^{3+} liga-se rapidamente aos lipídios e às proteínas presentes nas membranas biológicas, e pode competir com o íon Ca^{2+} por sítios comuns de ligação. Portanto, existem teorias de que a toxidez do alumínio pode ser iniciada pelo deslocamento do Ca^{2+} das membranas (RYAN et al, 1994).

RYAN et al. (1994) verificaram em plantas de trigo severa inibição do crescimento radicular provocada por doses de alumínio que não afetaram a absorção de Ca^{2+} .



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 4 – Estimativa do teor de cálcio no sistema radicular (Ca-R) e na parte aérea (Ca-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Em duas variedades de trigo, MOUSTAKAS et al. (1995) verificaram decréscimo do teor de cálcio na parte aérea e no sistema radicular com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. BERNAL e CLARK (1997) observaram aumento do teor de Ca na parte aérea de genótipos de sorgo submetidos a estresse por Al, enquanto que no sistema radicular não foi afetado.

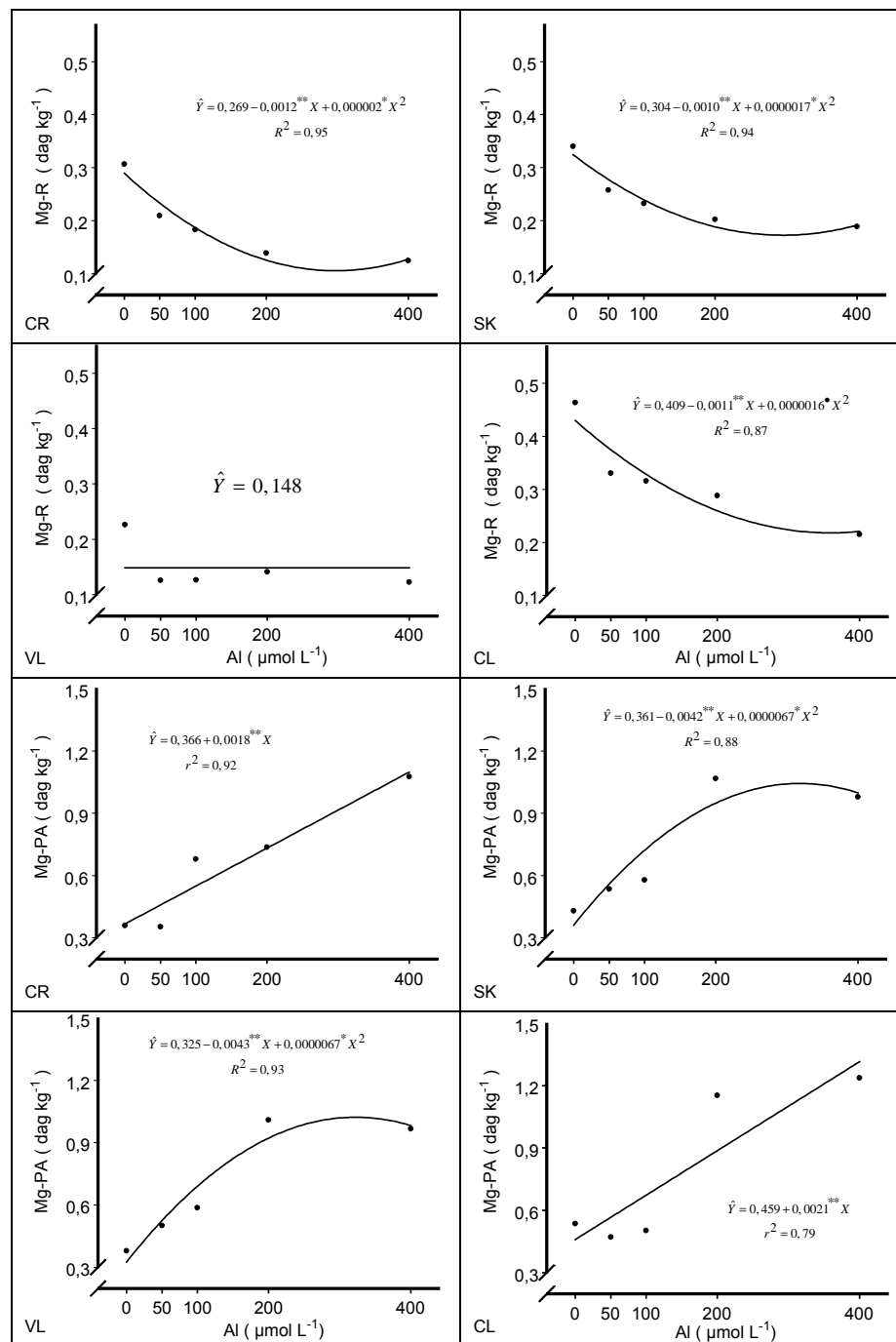
NOGUEIRA et al. (1989) e LIN e MIHRE (1991b) verificaram, em porta-enxertos de citros, decréscimo do teor de Ca na matéria seca do sistema radicular e da parte aérea com o aumento da concentração de Al. SANTOS et al. (1999b) também verificaram decréscimos de até 31% e 48% do teor de Ca, na parte aérea e no sistema radicular, respectivamente, em limoeiros 'Cravo' submetidos ao Al.

Uma possível explicação da diminuição do teor de Ca pode ser o efeito do Al sobre o sistema de transportadores de Ca, pois de acordo com HUANG et al. (1992) e RENGEL et al. (1995), o alumínio causa rápida e imediata diminuição do influxo de íons de cálcio, devido ao bloqueio de canais transportadores desse elemento, assim como aumento do efluxo de Ca pela ação de Ca^{2+} -ATPases, resultando em diminuição do teor de Ca.

O fato de o alumínio ter provocado decréscimo do teor de Ca na parte aérea do 'Volkameriano' e da 'Cleópatra' sem afetar esse teor no sistema radicular, pode ser devido a que o Al inibe a translocação do Ca do sistema radicular para a parte aérea; tal como foi verificado por HUANG et al. (1993) em plantas de trigo.

3.1.5. Magnésio

No limoeiro 'Volkameriano', não foi verificado efeito significativo do Al sobre o teor de magnésio no sistema radicular. Nos demais porta-enxertos, houve decréscimo desse teor com o aumento da concentração de Al (Figura 5). Em valores relativos, não foram verificadas diferenças significativas entre os porta-enxertos (Quadros 1 e 2).



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 5 – Estimativa do teor de magnésio no sistema radicular (Mg-R) e na parte aérea (Mg-PA) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Na matéria seca da parte aérea do limoeiro 'Cravo' e da tangerineira 'Cleópatra', houve aumento linear do teor de Mg em função da concentração de Al. Nos demais porta-enxertos, os máximos valores foram obtidos com 318 (SK) a 323 (SK) $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (Figura 5). Em valores relativos, os maiores acréscimos foram verificados nos limoeiros, em comparação às tangerineiras (Quadros 1 e 2).

Resultados contraditórios têm sido reportados em relação à influência do Al sobre o teor de Mg nos citros. LIN e MYHRE (1991b), em cinco porta-enxertos de citros, verificaram que o teor de Mg no sistema radicular aumentou até a concentração de 308 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Já na parte aérea, verificaram decréscimo desse teor até a concentração mencionada, permanecendo inalterado na presença de concentrações maiores de Al.

De acordo com NOGUEIRA et al. (1989), no sistema radicular de quatro porta-enxertos houve decréscimo do teor de Mg. Na parte aérea de três porta-enxertos ('Cravo', 'Sunki' e tangeleiro 'Orlando') também verificaram decréscimo, porém não detectaram influência significativa do Al no limoeiro 'Volkameriano'.

SANTOS et al. (1999b) não verificaram efeito do Al sobre o teor de Mg na parte aérea do 'Cravo' e do citrumeleiro 'Swingle'. No sistema radicular verificaram decréscimos em relação à testemunha de 14% e de 26%, respectivamente, na concentração de 278 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al.

A diminuição do teor de íons bivalentes devido à exposição do sistema radicular ao alumínio, pode ser resultado da competição entre o Mg e, ou o Ca com o Al (RENGEL, 1992). Tal competição ocorre no sistema radicular de muitas espécies vegetais (WAGATSUMA, 1983). Em plantas de *Lolium multiflorum*, foi verificado que o Al inibe a absorção de Mg dependente de energia, aumentando o K_m dessa absorção. Na variedade sensível, o aumento foi duas vezes maior em comparação à variedade tolerante (RENGEL e ROBINSON, 1989a).

A diminuição do teor de Mg no sistema radicular nem sempre resulta em decréscimo desse teor na parte aérea. Por exemplo, em mudas de *Picea abies* submetidas a 100 ou 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, GODBOLD e JENTSCHKE (1998)

verificaram significativo decréscimo do teor de Mg no apoplasto radicular, porém, o teor de Mg na parte aérea não foi afetado.

Desta forma, é provável que embora tenha havido decréscimo do teor de Mg no sistema radicular de três dos porta-enxertos avaliados (Figura 5), o mecanismo de transporte desse elemento para a parte aérea não tenha sido afetado pelo Al, o qual, aliado à diminuição da massa de matéria seca da parte aérea (Capítulo 2), resultou em aumento do teor de Mg, de forma contrária ao verificado com o efeito de diluição (JARRELL e BERVELY, 1981).

3.1.6. Enxofre

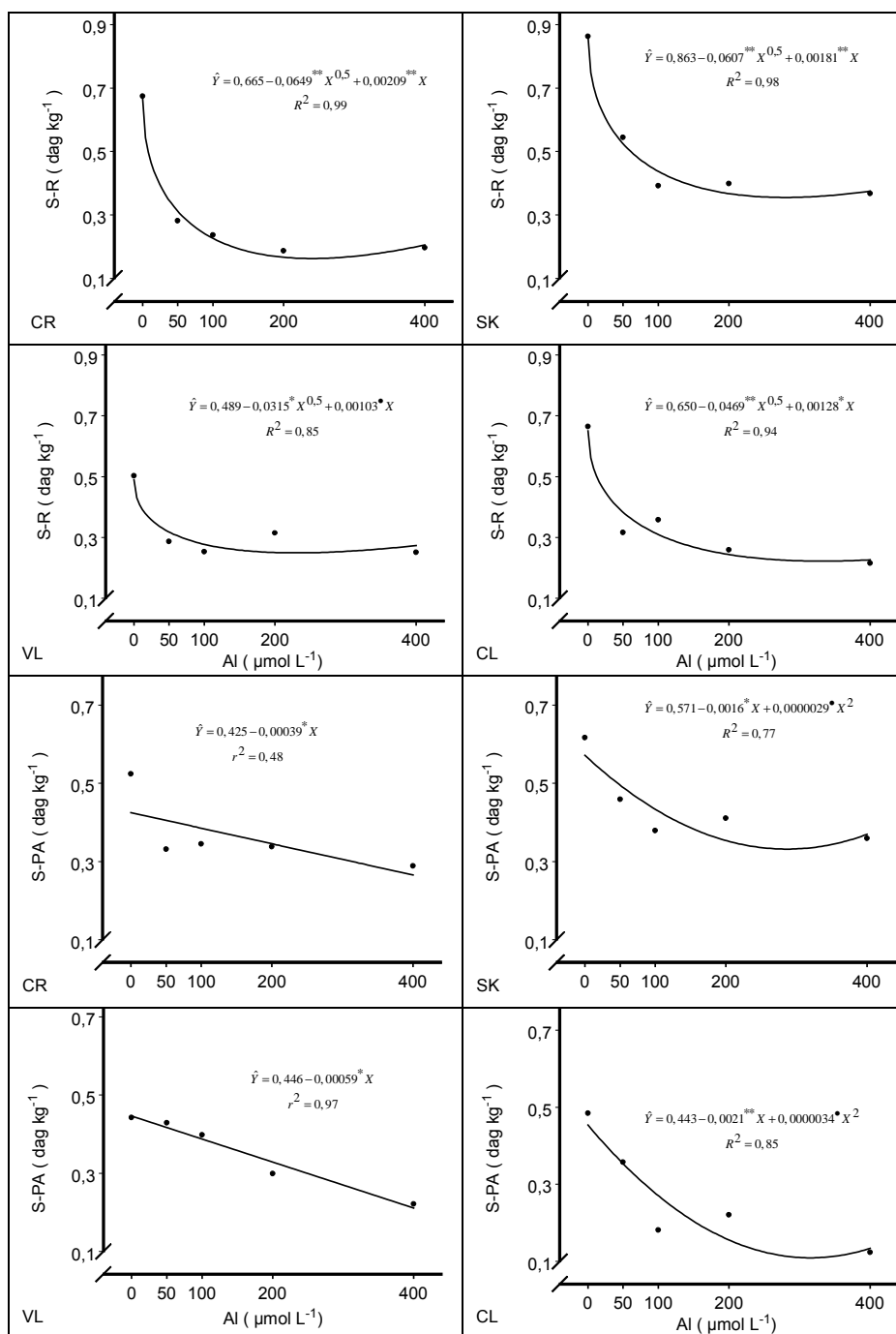
O teor de enxofre no sistema radicular dos quatro porta-enxertos avaliados decresceu em função da concentração de Al na solução nutritiva (Figura 6). Em comparação ao 'Volkameriano', o maior decréscimo foi verificado no limoeiro 'Cravo' (Quadros 1 e 2).

Na parte aérea, também houve decréscimo do teor de S com o aumento da concentração de Al (Figura 6). A tangerineira 'Cleópatra' apresentou maior diminuição em comparação à 'Sunki', o que causou a diferença significativa entre limoeiros e tangerineiras (Quadros 1 e 2).

Em genótipos de sorgo, BERNAL e CLARK (1997) observaram que o teor de S na parte aérea permaneceu relativamente constante com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. No sistema radicular, houve decréscimo do teor de S em função da concentração de Al na solução nutritiva.

Em limoeiro 'Cravo', SANTOS et al. (1999b) não verificaram efeito significativo do Al sobre o teor de S, tanto no sistema radicular como na parte aérea. Em citrumeleiro 'Swingle', observaram diminuição de até 29% na parte aérea na maior concentração avaliada de Al, de forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa.

Um dos possíveis motivos pelo qual o Al diminuiu o teor de S nos porta-enxertos avaliados, é que o mesmo altera os parâmetros cinéticos da absorção do S, assim como o seu fracionamento na planta. BONATO et al. (2000) verificaram que na presença do Al na solução nutritiva, a velocidade máxima de absorção de sulfato (V_{max}), maior na variedade sensível, decresceu



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 6 – Estimativa do teor de enxofre no sistema radicular (S-R) e na parte aérea (S-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

drasticamente na presença de Al, nas duas variedades, principalmente na tolerante. O Al diminuiu os teores de S-total e de S-sulfato, tanto nas raízes como na parte aérea, principalmente na variedade tolerante. Os teores de S-orgânico também decresceram nas duas variedades de sorgo.

3.2 Micronutrientes

3.2.1. Cobre

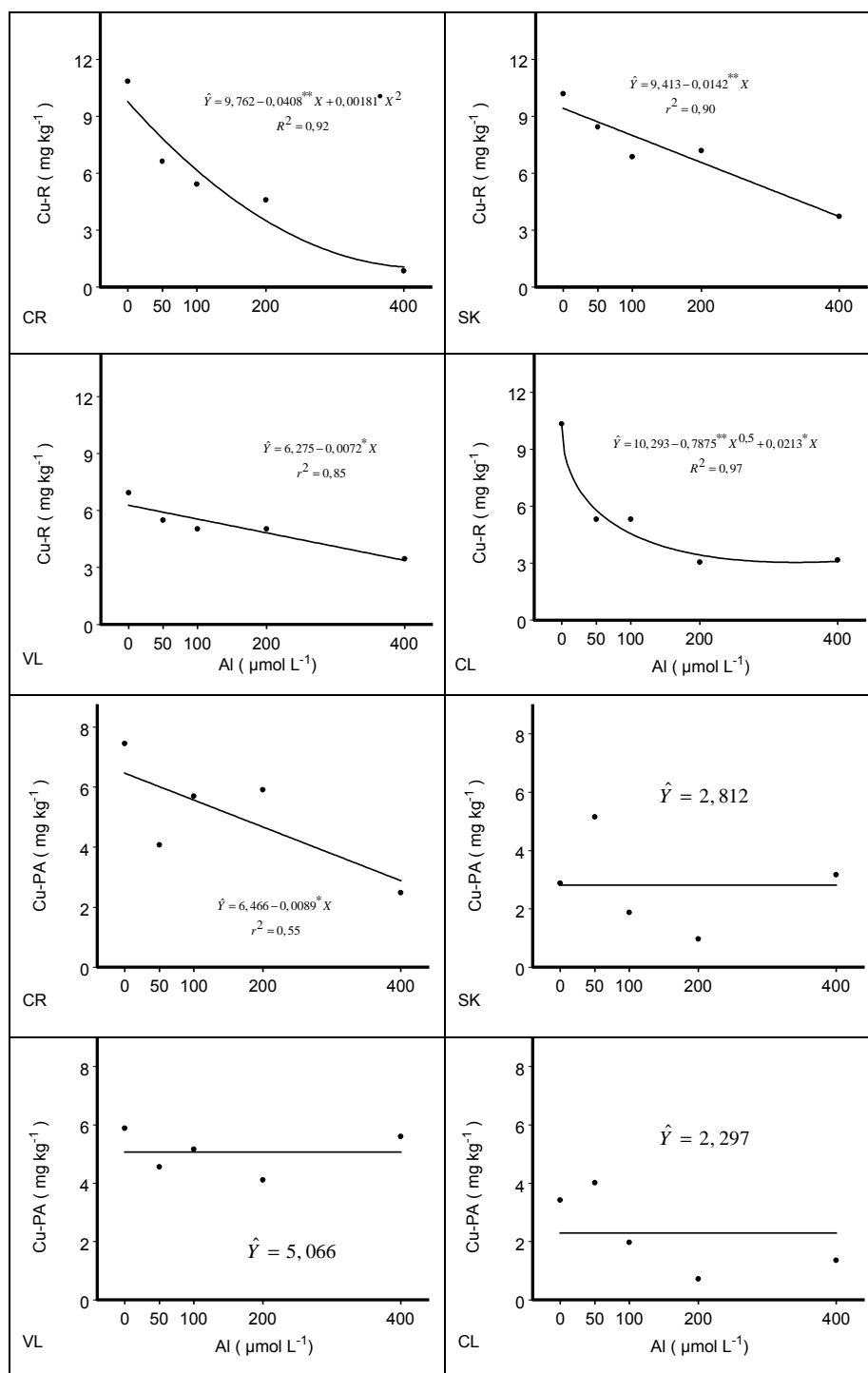
No sistema radicular de todos os porta-enxertos avaliados, o alumínio causou decréscimo do teor de cobre (Figura 7). No limoeiro 'Cravo' e na tangerineira 'Cleópatra' foram verificados os maiores decréscimos em comparação aos demais porta-enxertos (Quadros 1 e 2).

Na parte aérea do limoeiro 'Cravo', houve decréscimo do teor de Cu com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. Nos demais porta-enxertos, não foi verificado efeito significativo do Al (Figura 7). Em comparação à 'Sunki', o maior decréscimo ocorreu na 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2).

BERNAL e CLARK (1997) observaram decréscimos de até 30% do teor de Cu na parte aérea de genótipos de sorgo sensíveis ao Al, enquanto que nos genótipos tolerantes, o teor não foi afetado. No sistema radicular, os decréscimos foram de até 60% em relação à testemunha.

Em tomateiros crescidos em solução contendo Al, SIMON et al. (1994a) verificaram decréscimo do teor de Cu nas folhas e nos ramos, enquanto no sistema radicular houve aumento desse teor.

Em muitas espécies de citros utilizadas como porta-enxertos, têm sido verificado diminuição do teor de Cu no sistema radicular quando submetidas a estresse por alumínio. Por exemplo, LIN e MYHRE (1991b) observaram significativo decréscimo do teor de Cu no sistema radicular de cinco porta-enxertos de citros submetidos ao Al, sendo verificado no citrange 'Carrizo' o menor decréscimo. Na parte aérea, houve decréscimo do teor de Cu até a concentração de 100 ou 178 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al em três dos porta-enxertos



•, *, ** = Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 7 – Estimativa do teor de cobre no sistema radicular (Cu-R) e na parte aérea (Cu-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

avaliados por eles. Em mudas de laranjeira azeda, esse teor não foi alterado. No limoeiro 'Rugoso' aumentou até atingir valores de 41 mg kg⁻¹, enquanto nos demais porta-enxertos o teor de Cu foi em torno de 7 mg kg⁻¹.

No sistema radicular de limoeiro 'Cravo' e de citrumeleiro 'Swingle', SANTOS et al. (1999c) verificaram decréscimo de até 75% do teor de Cu na maior concentração avaliada de Al. Na parte aérea do limoeiro 'Cravo', verificaram decréscimo de 36% em relação à testemunha, já no citrumeleiro 'Swingle' o teor de Cu permaneceu praticamente inalterado.

Uma possível explicação para a diminuição do teor de Cu no sistema radicular dos quatro porta-enxertos avaliados e na parte aérea do 'Cravo', é que o Al compete com o Cu pelos mesmos sítios de absorção nas células radiculares (FOY, 1974).

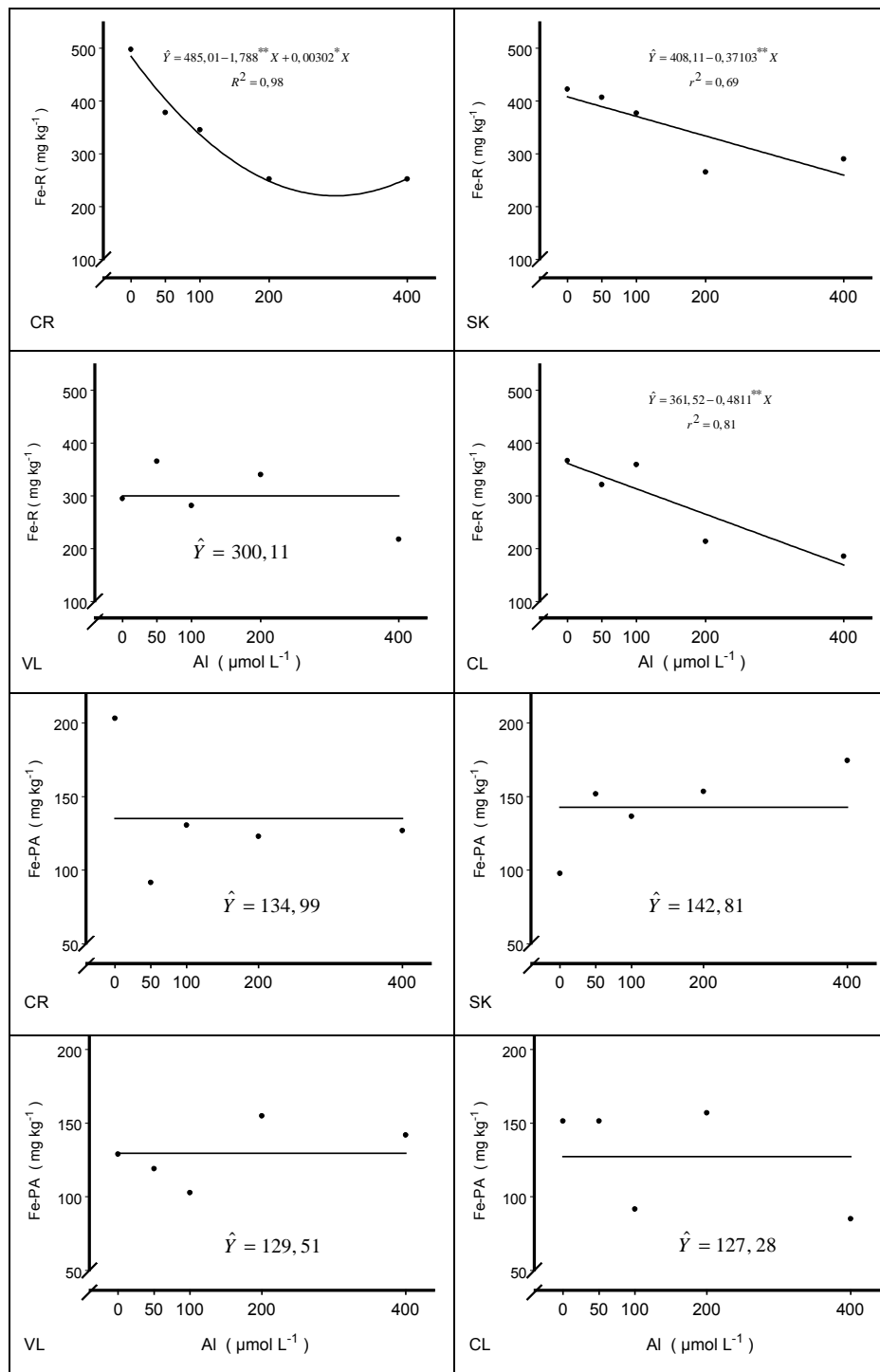
3.2.2. Ferro

No sistema radicular do limoeiro 'Volkameriano' não foi verificado efeito significativo do alumínio sobre o teor de ferro (Figura 8). Nos demais porta-enxertos, houve decréscimo do teor com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva. No limoeiro 'Cravo' foi verificada a maior diminuição em comparação ao 'Volkameriano' (Quadros 1 e 2).

Na parte aérea, não foi verificado efeito significativo do alumínio sobre o teor de ferro em nenhum dos porta-enxertos (Figura 8). Na tangerineira 'Cleópatra' verificou-se maior decréscimo dos valores relativos em comparação à 'Sunki' (Quadros 1 e 2). O decréscimo verificado no limoeiro 'Cravo' causou a diferença significativa entre limoeiros e tangerineiras (Quadros 1 e 2).

Embora as gramíneas possuam mecanismo diferente de absorção do ferro, resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa foram reportados com essas plantas. Assim, em plantas de sorgo, o teor de Fe na matéria seca da parte aérea não foi afetado pelo alumínio, enquanto que na matéria seca do sistema radicular houve decréscimo significativo desse teor na presença de alumínio na solução nutritiva (BERNAL e CLARK, 1997).

Em quatro porta-enxertos de citros avaliados por NOGUEIRA et al. (1989), os teores de Fe na matéria seca do sistema radicular e da parte aérea



*, ** = Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 8 – Estimativa do teor de ferro no sistema radicular (Fe-R) e na parte aérea (Fe-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

aumentaram até a concentração de $1.111 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo com maiores concentrações.

Na matéria seca do sistema radicular de cinco porta-enxertos, LIN e MYHRE (1991b) verificaram significativa diminuição do teor de Fe até a concentração de $308 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, permanecendo constante na presença de maiores concentrações. Na matéria seca da parte aérea, as variações provocadas pelo Al foram menores, em comparação aos observados no sistema radicular.

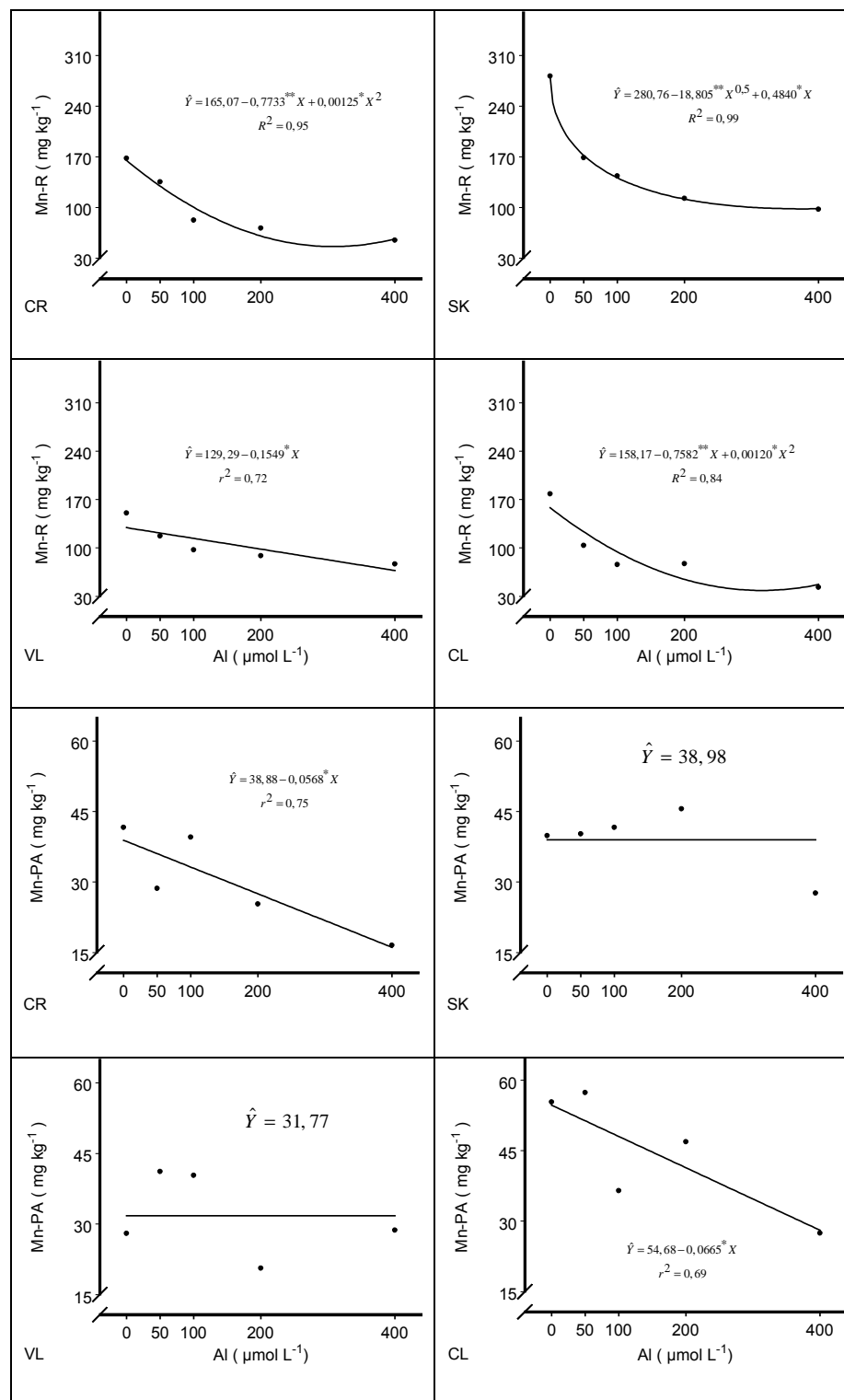
De acordo com SANTOS et al. (1999c), o teor de Fe na parte aérea de limoeiros 'Cravo', que cresceram durante 84 dias em solução nutritiva, não foi afetado pelas concentrações de alumínio avaliadas, enquanto que no sistema radicular verificaram decréscimo de 40% na maior concentração avaliada, de forma semelhante aos resultados obtidos nesta pesquisa. Em citrumeleiro 'Swingle', constataram aumento de 30% do teor de Fe na parte aérea na concentração de $556 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. No sistema radicular, após aumento de 33%, na concentração de $278 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, houve decréscimo de 31%, em relação à testemunha, na concentração de $1.111 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al.

3.2.3. Manganês

Em todos os porta-enxertos avaliados, com o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva, verificou-se decréscimo do teor de Mn no sistema radicular (Figura 9). Em valores relativos, os maiores decréscimos foram verificados nas tangerineiras, quando comparadas com os limoeiros (Quadros 1 e 2).

Na matéria seca da parte aérea do limoeiro 'Cravo' e da tangerineira 'Cleópatra', houve decréscimo do teor de Mn em função da concentração de Al. No limoeiro 'Volkameriano' e na tangerineira 'Sunki', não foram verificados efeitos significativos do Al sobre o teor de Mn (Figura 9). Em comparação ao 'Volkameriano', verificou-se maior decréscimo no 'Cravo' (Quadros 1 e 2), não sendo detectadas diferenças significativas nos demais contrastes.

Resultados semelhantes foram obtidos por SANTOS et al. (1999c) com o limoeiro 'Cravo', onde verificaram decréscimo do teor de Mn na matéria seca



*, ** = Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Figura 9 – Estimativa do teor de manganês no sistema radicular (Mn-R) e na parte aérea (Mn-PA) dos limoeiros ‘Cravo’ (CR) e ‘Volkameriano’ (VL) e das tangerineiras ‘Sunki’ (SK) e ‘Cleópatra’ (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

do sistema radicular de 75% em relação à testemunha, na concentração de 278 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, permanecendo inalterado nas maiores concentrações. Na parte aérea, o teor de Mn permaneceu inalterado. Em citrumeleiro 'Swingle', verificaram decréscimo de 56% (278 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al) do teor de Mn no sistema radicular, enquanto na parte aérea esse decréscimo foi de 30%.

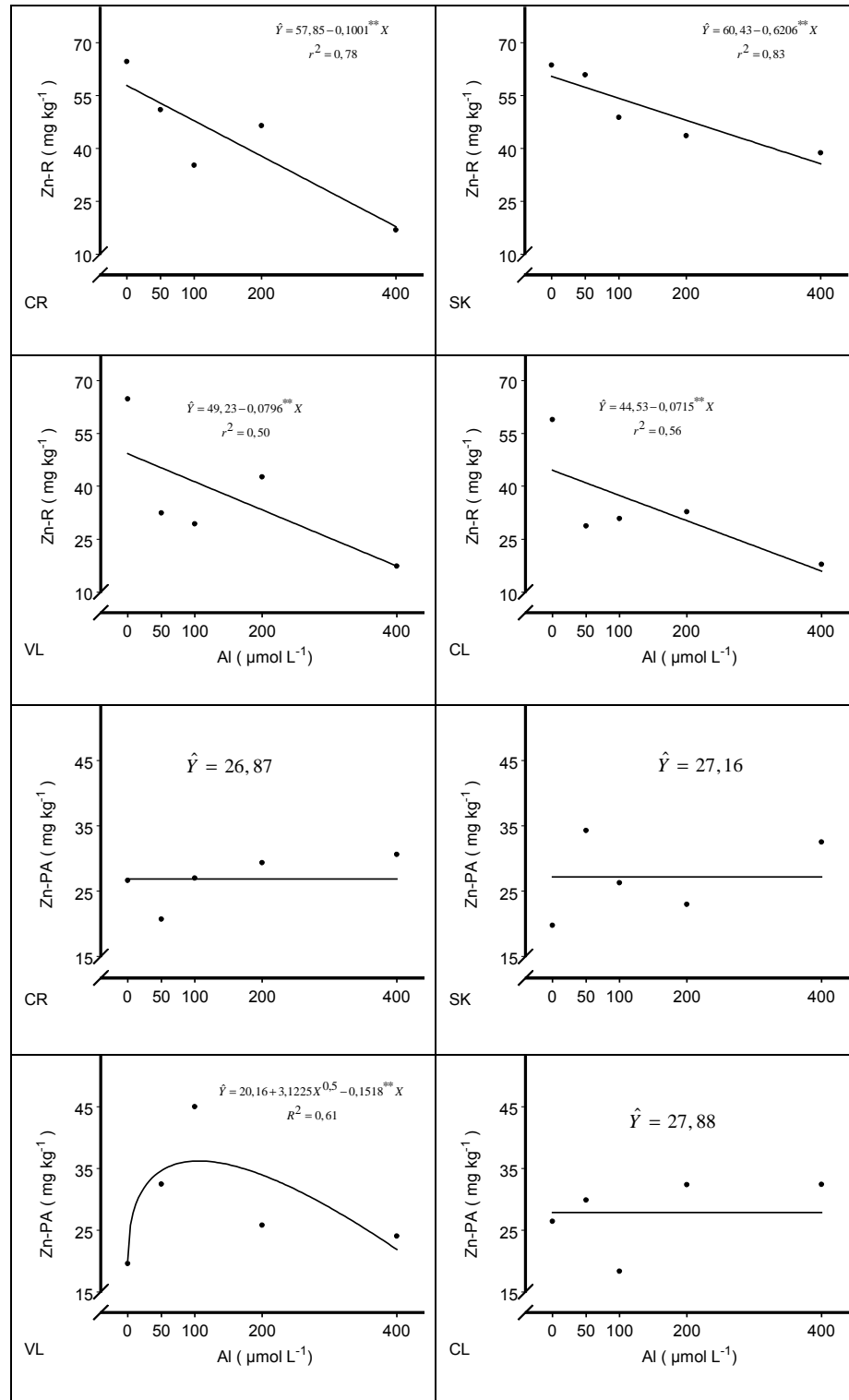
Em quatro porta-enxertos de citros submetidos ao Al, NOGUEIRA et al. (1989) verificaram decréscimos significativos do teor de Mn, tanto na matéria seca das folhas como do sistema radicular. LIN e MIHRE (1991b) verificaram decréscimo do teor de Mn no sistema radicular de cinco porta-enxertos de citros, até a concentração de 308 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Na parte aérea, o teor de Mn permaneceu praticamente inalterado com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva.

Resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa foram verificados em outras espécies, como no tomateiro (SIMON et al., 1994a) e em plantas de sorgo (BERNAL e CLARK, 1997), de trigo e de cevada (MALKANTHI et al., 1995), nas quais o Al causou decréscimo do teor de Mn da matéria seca na parte aérea e no sistema radicular.

3.2.4. Zinco

Em todos os porta-enxertos avaliados, o teor de zinco na matéria seca do sistema radicular decresceu em função do aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva (Figura 10). Em comparação à 'Sunki', houve maior decréscimo desse teor na 'Cleópatra' (Quadros 1 e 2).

Na matéria seca da parte aérea do limoeiro 'Volkameriano' verificou-se aumento do teor de Zn, cujo máximo valor foi obtido na concentração estimada de 106 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al (Figura 10), diminuindo na presença de maiores concentrações de Al, porém, sem atingir valores menores em comparação à testemunha. Nos demais porta-enxertos, não foram verificados efeitos significativos do Al sobre o teor de Zn. Menores valores relativos foram verificados no 'Cravo' e na 'Cleópatra', quando comparados com o 'Volkameriano' e a 'Sunki', respectivamente (Quadros 1 e 2).



*** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 10 – Estimativa do teor de zinco no sistema radicular (Zn-R) e na parte aérea (Zn-PA) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

Em duas variedades de sorgo, GONÇALVES et al. (1996) verificaram que o alumínio causou diminuição do teor de Zn no sistema radicular e na parte aérea, provocando também, na variedade sensível ao Al, decréscimo da concentração de ácido ribonucléico (RNA), tanto nas raízes quanto na parte aérea.

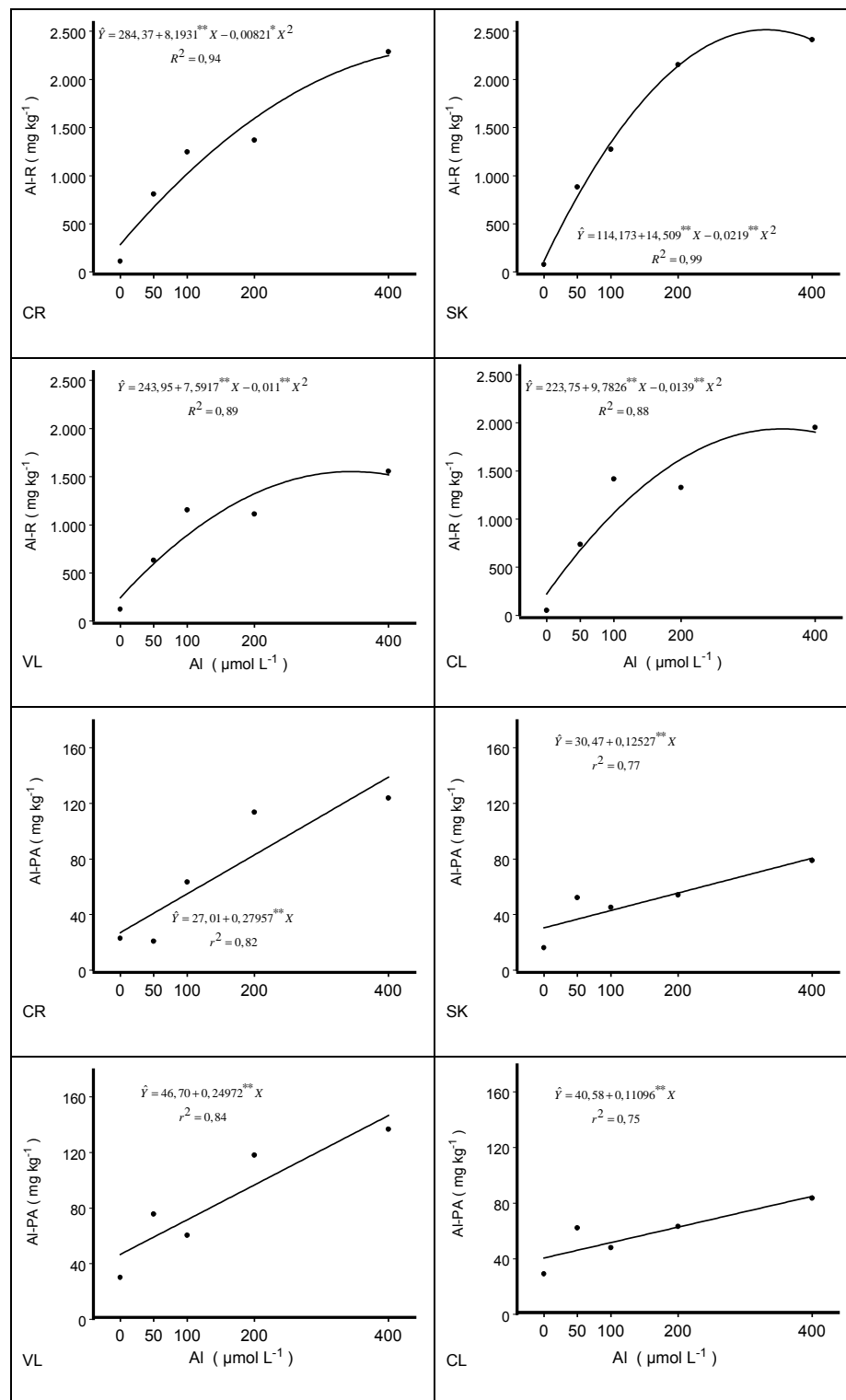
Resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa foram verificados por SANTOS et al. (1999c), em mudas de limoeiro 'Cravo' crescidas na presença de alumínio, nas quais o teor de Zn na matéria seca da parte aérea e do sistema radicular permaneceu inalterado até a concentração de 833 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Em mudas de citrumeleiro 'Swingle', também não verificaram efeito do Al sobre o teor de Zn na parte aérea, enquanto que no sistema radicular verificaram decréscimo de 59% em relação à ausência de Al.

LIN e MYHRE (1991b) observaram em cinco porta-enxertos de citros, decréscimo do teor de Zn no sistema radicular em função da concentração de Al; já na parte aérea, essa característica permaneceu inalterada. NOGUEIRA et al. (1989) verificaram decréscimos significativos do teor de Zn, tanto no sistema radicular quanto na parte aérea de quatro porta-enxertos de citros submetidos a estresse por alumínio.

Um dos possíveis motivos para o decréscimo do teor de Zn no sistema radicular dos porta-enxertos avaliados poderia ser, de acordo com RENGEL e ROBINSON (1989b), que o alumínio compete com o zinco nos sítios de adsorção no apoplasto radicular e, nos sítios de absorção no simplasto radicular, o qual resulta em diminuição do influxo de Zn.

3.3. Alumínio

Em todos os porta-enxertos avaliados, o teor de alumínio na matéria seca do sistema radicular aumentou significativamente em função da concentração de Al na solução nutritiva (Figura 11). Os maiores aumentos desse teor foram verificados no 'Cravo' em comparação ao 'Volkameriano' e, na 'Cleópatra' em comparação com a 'Sunki' (Quadros 1 e 2). Verificou-se que



** = Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 11 – Estimativa do teor de alumínio no sistema radicular (Al-R) e na parte aérea (Al-PA) dos limoeiros 'Cravo' (CR) e 'Volkameriano' (VL) e das tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), em função da concentração de alumínio (Al) na solução nutritiva.

as duas tangerineiras apresentaram maior teor de alumínio quando comparadas aos dois limoeiros.

Na parte aérea, também foram verificados aumentos dos teores de Al na matéria seca em função da concentração de alumínio na solução nutritiva, em todos os porta-enxertos (Figura 11). Na maior concentração avaliada de Al, esses aumentos, em comparação com os aumentos dos teores de Al no sistema radicular, foram de 11,4 ('Volkameriano') a 30,6 ('Sunki') vezes menores. Em valores relativos, o menor aumento do teor de Al foi verificado na 'Cleópatra', quando comparada à 'Sunki' (Quadros 1 e 2), não sendo detectadas diferenças significativas nos demais contrastes.

Resultados semelhantes foram obtidos por LIN e MYHRE (1991b), que verificaram aumento do teor de Al no sistema radicular e na parte aérea em função da concentração de Al na solução nutritiva, sendo que até a concentração de $308 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, a tangerineira 'Cleópatra' apresentou maior teor de Al no sistema radicular em comparação aos outros porta-enxertos avaliados.

SANTOS et al. (1999c) também verificaram aumento do teor de Al no sistema radicular de dois porta-enxertos cítricos que cresceram em solução nutritiva contendo alumínio. Na parte aérea do limoeiro 'Cravo', não detectaram influência da concentração de Al na solução, enquanto que no citrumeleiro 'Swingle' verificaram aumento do teor de Al.

De acordo com WAGATSUMA (1983), a maior proporção do alumínio presente no sistema radicular está ligada às substâncias pécticas da parede celular, porém, uma parte penetra no protoplasto e se combina com ácidos nucléicos e com fosfatos.

Um dos fatores associados com a tolerância diferencial das plantas ao alumínio está relacionado com diferenças na absorção, no transporte e no acúmulo de alumínio no sistema radicular e na parte aérea. De acordo com RENGEL (1996), genótipos tolerantes podem acumular mais ou menos alumínio no sistema radicular em comparação aos mais sensíveis ao Al. Por outro lado, em algumas pesquisas realizadas não foi possível detectar diferenças entre genótipos tolerantes e sensíveis em relação ao acúmulo de Al no sistema radicular (ZHANG e TAYLOR, 1989; TICE et al. 1992).

Segundo RENGEL (1996), possíveis motivos, para esses resultados contraditórios, são os seguintes: **a)** utilização de diferentes segmentos do sistema radicular, variando de 2 mm até a totalidade, **b)** inabilidade analítica para conhecer as formas químicas do alumínio, **c)** insuficiente capacidade analítica para determinar o Al ligado à parede celular e, **d)** desconsideração da presença de mucilagens que afetam a ligação e a absorção do Al pelas raízes

Baseado no menor teor de Al na parte aérea das plantas em comparação ao teor no sistema radicular, aparentemente, as plantas excluem o Al do sistema de transporte para a parte aérea (TAYLOR, 1991), fato que explicaria de certa forma o menor acúmulo de Al na parte aérea dos quatro porta-enxertos avaliados, em comparação ao acúmulo de Al no sistema radicular (Figura 11).

O aumento do teor de Al nas folhas, concomitantemente com a deficiência de Ca, resultou em aumento da respiração em plantas de *Picea rubens* (McLAUGHLIN et al., 1990). Aumento do teor de Al na parte aérea e decréscimo do teor de Ca foram observados neste experimento, sendo esse fato, outro provável motivo do decréscimo da taxa de fotossíntese líquida (Capítulo 1).

Um dos motivos da maior tolerância ao Al apresentada pela 'Cleópatra' (Capítulos 1 e 2), pode ser devido ao maior acúmulo de Al no sistema radicular, que resultou no transporte de menores quantidades de Al para a parte aérea (Figura 11).

4. CONCLUSÕES

Com o aumento da concentração de alumínio na solução nutritiva, verificou-se na matéria seca do sistema radicular de todos os porta-enxertos, decréscimos dos teores de N-orgânico, P, Cu, Mn e Zn.

Na matéria seca da parte aérea de todos os porta-enxertos, houve decréscimos dos teores de P e S em função da concentração de alumínio.

Nas tangerineiras 'Sunki' e 'Cleópatra', os teores de N-orgânico, Cu, Fe e Zn na matéria seca da parte aérea, não foram afetados pelo alumínio.

No limoeiro 'Volkameriano' e na tangerineira 'Cleópatra' não foi verificada influência do Al sobre o teor de K no sistema radicular. Na parte aérea do 'Volkameriano' houve decréscimo do teor de K.

O teor de Ca no sistema radicular do limoeiro 'Cravo' decresceu em função da concentração de Al. Na parte aérea, houve decréscimo do teor de Ca nos porta-enxertos 'Cravo', 'Volkameriano' e 'Cleópatra'. Com exceção do limoeiro 'Volkameriano', verificou-se decréscimo do teor de Mg no sistema radicular dos demais porta-enxertos. Na parte aérea, houve aumento do teor de Mg em todos os porta-enxertos.

No limoeiro 'Cravo' foram verificados maiores decréscimos da maioria dos nutrientes, em comparação aos outros porta-enxertos, tanto no sistema radicular quanto na parte aérea.

Houve aumento do teor de Al no sistema radicular e na parte aérea de todos os porta-enxertos em função da concentração de Al na solução nutritiva,

sendo o acúmulo no sistema radicular de 11,4 a 30,6 vezes maior em comparação à parte aérea.

A tangerineira 'Cleópatra', considerada a mais tolerante ao alumínio, apresentou maior acúmulo de Al no sistema radicular e menor acúmulo na parte aérea, quando comparada aos demais porta-enxertos.

5. DISCUSSÃO GERAL

Neste experimento, o alumínio causou decréscimo dos teores de P e S na matéria seca da parte aérea de todos os porta-enxertos. Outro nutriente cujo teor, na parte aérea, diminuiu nos porta-enxertos 'Cravo', 'Volkameriano' e 'Cleópatra' foi o Ca. Na parte aérea do limoeiro 'Cravo', verificou-se também decréscimos dos teores de N-orgânico, Cu e Mn. No sistema radicular de todos os porta-enxertos houve também decréscimo dos teores de N-orgânico, Cu, Fe e Zn (Capítulo 3).

Como na literatura científica não foram encontradas informações sobre os teores de nutrientes apropriados para mudas de citros, foram utilizados para comparação teores de nutrientes para plantas adultas em fase produtiva (MALAVOLTA e NETTO, 1989; WUTSCHER e SMITH, 1993). Com base nessas comparações, os teores de Ca na parte aérea de todos os porta-enxertos, e de N, P, Mn e Cu na parte aérea do limoeiro 'Cravo' poderiam ser considerados como deficientes.

Porém, a presença ou ausência de frutos, a idade da planta e das folhas, a época do ano e o genótipo afetam o teor de nutrientes e, conseqüentemente, a faixa de valores considerada como adequada (MALAVOLTA e NETTO, 1989). Além disso, de acordo com BLAIR (1993), a absorção de determinado nutriente pela planta é afetada pela atividade do nutriente na solução, a taxa transpiratória, a temperatura, a intensidade luminosa e a aeração do sistema radicular.

Portanto, é provável que tenham ocorrido deficiências e, ou baixos teores de outros nutrientes e em outros porta-enxertos, além dos mencionados anteriormente.

Todos os macro e micronutrientes têm participação direta ou indireta no processo fotossintético (MARSCHNER, 1995), existindo várias pesquisas onde foram verificadas que a deficiência e, ou baixos teores de determinado nutriente, causa decréscimo da taxa de fotossíntese líquida e da eficiência fotoquímica (DAMDINSUREN et al., 1995; BARNES et al., 1995; DANNEHL et al., 1996; BROOKS, 1998).

Conseqüentemente, esses decréscimos dos teores de nutrientes resultaram em diminuição da concentração de clorofila *a*, da taxa de fotossíntese líquida e das características da fluorescência da clorofila, como a relação F_v/F_0 , a área acima da curva e a relação F_v/F_m (com exceção na tangerineira 'Cleópatra', Capítulo 1).

Com a diminuição de fotoassimilados disponíveis para a planta, houve decréscimo da taxa relativa de crescimento da matéria fresca total da planta, do crescimento da parte aérea e da alocação de fotoassimilados para as folhas, em comparação ao sistema radicular, cujo crescimento aumentou até determinada concentração de Al, porém sem atingir valores menores aos obtidos na ausência de Al na solução nutritiva (Capítulo 2). Apesar desse efeito do Al sobre o sistema radicular, houve diminuição da quantidade de pêlos absorventes em concentrações maiores que $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo, conseqüentemente, a superfície absorviva de água e de nutrientes.

Concomitantemente com a diminuição do teor de vários nutrientes na parte aérea, houve também aumento do teor de Al na parte aérea (Capítulo 3), podendo ter influenciado, de forma direta ou indireta, o crescimento da planta, as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila.

No limoeiro 'Cravo', considerado o mais susceptível ao Al, houve maior decréscimo dos teores de nutrientes em comparação aos demais porta-enxertos. Com isso, a taxa de fotossíntese líquida e as características da fluorescência da clorofila foram mais afetadas em comparação às tangerineiras, resultando em menor crescimento desse porta-enxerto na presença do Al na solução nutritiva.

A tangerineira 'Cleópatra', considerada a mais tolerante ao Al, apresentou consistentemente menor efeito inibitório do Al sobre as características avaliadas neste experimento. Uma possível explicação para esse fato, pode ter sido o maior acúmulo de Al no sistema radicular, que resultou em menor acúmulo de Al na parte aérea em comparação aos demais porta-enxertos (Capítulo 3).

CONCLUSÕES GERAIS

A presença de baixas concentrações de alumínio (14, 18 e 55 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al) estimulou a taxa fotossintética líquida (A) nos limoeiro 'Cravo' (CR) e nas tangerineiras 'Sunki' (SK) e 'Cleópatra' (CL), respectivamente, verificando-se decréscimo com o aumento da concentração. No limoeiro 'Volkameriano' (VL) houve efeito inibitório do Al na A, mesmo em baixas concentrações. Os maiores efeitos inibitórios do Al sobre a A foram verificados nos limoeiros. Com o aumento da concentração de Al, houve incremento da concentração interna de CO_2 (C_i) em todos os porta-enxertos, evidenciando que as restrições estomáticas não foram as responsáveis pela diminuição da A.

A condutância estomática ao vapor de água (g_s) e a taxa transpiratória (E) aumentaram na presença do Al nas duas tangerineiras. Nos dois limoeiros, não foram verificados efeitos significativos do Al sobre a g_s . No limoeiro CR, a E aumentou em função das concentrações de Al.

A eficiência do uso da água aumentou na presença de baixas concentrações de Al (30 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$) nas duas tangerineiras, ocorrendo decréscimo em concentrações maiores. Nos limoeiros, houve decréscimo dessa característica mesmo em baixas concentrações de Al. Indícios de que esses resultados mencionados ocorreram durante a maior parte do ciclo foram fornecidos pelos valores estimados da discriminação isotópica de carbono.

Todas as características relacionadas com a fluorescência da clorofila diminuíram em função das concentrações de Al, com exceção da relação F_v/F_m

na tangerineira CL. Em valores relativos, a maior diminuição foi verificada nos limoeiros. A área acima da curva de fluorescência foi a característica mais afetada pelo Al.

A presença de baixas concentrações de Al (16 a 25 $\mu\text{mol L}^{-1}$) aumentou o teor foliar de clorofila *a* nas tangerineiras, verificando-se decréscimo com o aumento da concentração. Nos limoeiros, mesmo em baixas concentrações, houve efeito inibitório do Al sobre a clorofila *a*. No VL e na CL ocorreram decréscimos do teor de clorofila *b*. Na tangerineira SK não foi verificado efeito significativo do Al sobre o teor foliar de clorofila total. Os maiores efeitos inibitórios do Al foram verificados nos limoeiros.

Em todos os porta-enxertos, a taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta aumentou na presença de baixas concentrações de Al na solução nutritiva (15 a 35 $\mu\text{mol L}^{-1}$), decrescendo na presença de maiores concentrações.

No limoeiro 'Cravo' verificou-se decréscimo de crescimento do sistema radicular a partir de 23 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al. Nos demais porta-enxertos, houve aumento de crescimento na presença do Al, atingindo valores máximos na presença de 91 a 117 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, diminuindo com maiores concentrações, porém, sem atingir valores menores em comparação à testemunha.

O crescimento da parte aérea, na presença de Al, diminuiu em todos os porta-enxertos, verificando-se no limoeiro 'Cravo' o maior decréscimo.

A relação massa de raiz: parte aérea aumentou em função da concentração de Al, em todos os porta-enxertos avaliados, atingindo valores máximos entre 235 a 260 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al, evidenciando que o efeito negativo do Al foi maior na parte aérea.

Na presença do Al, houve menor alocação de fotoassimilados para as folhas, evidenciado pelo decréscimo da relação de área foliar e da relação de massa foliar em todos os porta-enxertos.

Com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, verificou-se na matéria seca do sistema radicular de todos os porta-enxertos, decréscimos dos teores de N-orgânico, P, Cu, Mn e Zn.

Na matéria seca da parte aérea de todos os porta-enxertos, houve decréscimos dos teores de P e S em função da concentração de Al.

Nas tangerineiras 'Sunki' e 'Cleópatra', os teores na matéria seca da parte aérea de N-orgânico, Cu, Fe e Zn, não foram afetados pelo Al.

No limoeiro 'Volkameriano' e na tangerineira 'Cleópatra' não foi verificada influência do Al sobre o teor de K no sistema radicular. Na parte aérea do 'Volkameriano' houve decréscimo do teor de K.

O teor de Ca no sistema radicular do limoeiro 'Cravo' decresceu em função da concentração de Al. Na parte aérea, houve decréscimo do teor de Ca nos porta-enxertos 'Cravo', 'Volkameriano' e 'Cleópatra'. Com exceção do limoeiro 'Volkameriano', verificou-se decréscimo do teor de Mg no sistema radicular dos demais porta-enxertos. Na parte aérea, houve aumento do teor de Mg em todos os porta-enxertos.

No limoeiro 'Cravo' foram verificados maiores decréscimos, da maioria dos nutrientes, em comparação aos demais porta-enxertos, tanto no sistema radicular quanto na parte aérea.

Houve aumento do teor de Al no sistema radicular e na parte aérea de todos os porta-enxertos, em função da concentração de Al na solução nutritiva: esse acúmulo no sistema radicular foi de 11,4 a 30,6 vezes maior em comparação à parte aérea.

Considerando-se as características das trocas gasosas, da fluorescência da clorofila e do crescimento de planta, o limoeiro 'Cravo' foi o mais sensível ao Al, enquanto que a tangerineira 'Cleópatra', foi o porta-enxerto mais tolerante.

BIBLIOGRAFIA

- ALAM, S. M. Effects of aluminium on the dry matter and mineral content of rice. **Journal of Science and Technology**, 7:1-3, 1983.
- ALLISON, J. D.; BROWN, D. S.; NOVO-GRADAC, K. J. **MINTEQA2 / PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual**. Athens: U.S. Environmental Protection Agency, 1991. 107p.
- ANDERSON, C. A. Fruit yields, tree size, and mineral nutrition relationships in 'Valencia' orange trees as affected by liming. **Journal of Plant Nutrition**, 10: 1907-1916, 1987.
- ANDERSSON, M. Toxicity and tolerance of aluminium in vascular plants. **Water, Air & Soil Pollution**, 39:439-462, 1988.
- ARNON, D. J. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Poliphenoloxidases in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, 24:1-15, 1949.
- BAIER, A. C.; SOMERS, D. J.; GUSTAFSON, J. P. Aluminium tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Plant Breeding**, 114: 291-296, 1995.
- BALIGAR, V. C.; ANGHINONI, I.; PITTA, G. V. E.; SANTOS, H. L.; CUNHA FILHO, E.; SCHAFFERT, R. E. Aluminum effects on plant and nutrient uptake parameters of soil and solution grown sorghum genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, 18:2325-2338, 1995.
- BAÑULS, J.; PRIMO-MILLO, E. Effects of salinity on some *Citrus* scion-rootstock combinations. **Annals of Botany**, 76:97-102, 1995.
- BAÑULS, J.; PRIMO-MILLO, E. Effects of chloride and sodium on gas exchange parameters and water relations of *Citrus* plants. **Physiologia Plantarum**, 86:115-123, 1992.

- BAÑULS, J.; SERNA, M. D.; LEGAZ, F.; TALON, M.; PRIMO-MILLO, E. Growth and gas exchange parameters of *Citrus* plants stressed with different salts. **Journal of Plant Physiology**, **150**:194-199, 1997.
- BARNES, J. D., PFIRRMANN, T., STEINER, K. Effects of elevated CO₂, elevated O₃ and potassium deficiency on Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]: seasonal changes in photosynthesis and non-structural carbohydrate content. **Plant, Cell and Environment**, **18**:1345-1357, 1995.
- BEADLE, C. L. Growth analysis. In: HALL, D. O. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. Londres: Chapman & Hall, 1993. p.36-46.
- BENNET, R. J.; BREEN, C. M.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. The aluminium signal: new dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. **Plant and Soil**, **134**:153-166, 1991.
- BERNAL, J. H.; CLARK, R. B. Mineral acquisition of aluminum-tolerant and sensitive sorghum genotypes grown with varied aluminum. **Communications in Soil and Plant Analysis**, **28**:49-62, 1997.
- BLAIR, G. Nutrient efficiency—what do we really mean?. In: RANDHALL, P. J. **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.205-213.
- BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In: HALL, D. O. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. Londres: Chapman & Hall, 1993. p.193-206.
- BONATO, C. M.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; ALVAREZ V., V. H. Efeito do alumínio sobre a absorção, a partição e a utilização de enxofre em sorgo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, **12**:17-24, 2000.
- BORKOWSKA, B. Experimental system for investigation of aluminium toxicity in fruit trees. In: WRIGHT, R. J. **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. p.999-1004.
- BRACCINI, M. C. L.; MARTINEZ, H. E. P.; PEREIRA, P. R. G.; SAMPAIO, N. F.; SILVA, E. A. M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **22**:435-442, 1998.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, **21**:73-85, 1974.

- BROOKS, A. Effects of phosphorus nutrition on Ribulose-1,5-biphosphate carboxylase activation, photosynthetic quantum yield and amount of some Calvin-cycle metabolites in spinach leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, **13**:221-237, 1998.
- BRUGNOLI, E.; LAUTERI, M. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C₃ non-halophytes. **Plant Physiology**, **95**:628-635, 1991.
- CAKMAK, I.; HORST, J. H. Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, **83**:463-468, 1991.
- CAMBRAIA, J.; GOMES, M. M S.; SANT'ANNA, R.; ESTEVÃO, M. M. Efeito de diferentes níveis de alumínio na solução nutritiva sobre a composição da fração nitrogenada em sorgo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, **2**:47-52, 1990.
- CAMBRAIA, J.; PIMENTA, J. A.; ESTEVÃO, M. M; SANT'-ANNA, R. Aluminum effects on nitrate uptake and reduction in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, **12**:1435-1445, 1989.
- CAMBRAIA, J. **Metabolismo mineral de plantas**. Viçosa: UFV, 1997. 131p.
- CANAL, I. N.; MIELNICZUK, J. Parâmetros de absorção de fosforo em milho, *Zea mays* L., afetados pela interação alumínio-cálcio. **Ciência e Cultura (São Paulo)**, **35**:336-340, 1983.
- CARADUS, J. R; DUNLOP, J.; WEWALA, S.; MACKAY, A. D.; HART, A. L.; BOSCH, J.; HAY, M. J. M.; LAMBERT, M. G. Nitrogen and phosphorus concentration of white clover genotypes differing in response to added phosphorus. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, **36**:79-86, 1993.
- CHEN, J.; SUCOFF, E. I.; STADELMANN, E. J. Aluminium and temperature alteration of cell membrane permeability of *Quercus rubra*. **Plant Physiology**, **96**:644-649, 1991.
- CHEN, K.; HU, G.; KEUTGEN, N.; MARC, J. J. JANSSENS, F. L. Effects of NaCl salinity and CO₂ enrichment on pepino (*Solanum muricatum* Ait.) I. Growth and yield. **Scientia Horticulturae**, **81**:25-41, 1999.
- CISCATO, M.; VALCKE, R.; LOVEN, K.; CLIJSTERS, H.; NAVARI-IZZO, F. Effects of in vivo copper treatment on the photosynthetic apparatus of two *Triticum durum* cultivars with different stress sensitivity. **Physiologia Plantarum**, **100**: 901-908, 1997.

- CLUNE, T. S.; COPELAND, L. Effects of aluminium on canola roots. **Plant and Soil**, **216**:27-33, 1999.
- CRAMER, G. R.; ALBERICO, G. J.; SCHMIDT, C. Leaf expansion limits dry matter accumulation of salt-stressed maize. **Australian Journal of Plant Physiology**, **21**:663-674, 1994.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados no melhoramento genético**. Viçosa: Imprensa Universitária UFV, 1994. 390p.
- DA MATTA, F. M.; MAESTRI, M.; MOSQUIM, P. R.; BARROS, R. S. Photosynthesis in coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) as affected by winter and summer conditions. **Plant Science**, **128**:43-50, 1997.
- DAMDINSUREN, S., OSAKI, M., TADANO, T. Quenching of chlorophyll a fluorescence by oxygen in normal air in maize leaves grown under nitrogen deficiency conditions. **Soil Science and Plant Nutrition**, **41**:539-546, 1995.
- DANNEHL, H., WIETOSKA, H., HECKMANN, H., GODDE, D. Changes in D1-protein turnover and recovery of photosystem II activity precede accumulation of chlorophyll in plants after release from mineral stress. **Planta**, **199**:34-42, 1996.
- DECARLOS NETO, A. **Adubação e nutrição nitrogenada de porta-enxertos de citros produzidos em tubetes**. Viçosa: UFV, 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- DEMATTE, J. L.; VITTI, G. C. Alguns aspectos relacionados ao manejo de solos para citros. In: SEGUNDO SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, Campinas, **Anais...** p.67-89, 1992.
- DEVINE, T. E.; FOY, C.D.; FLEMING, A. L. Development of alfalfa strains with differential tolerance to aluminum toxicity. **Plant and Soil**, **44**:73-79, 1976.
- DOWDY, R. H.; NATER, E. A.; DOLAN, M. S. Quantification of the length and diameter of root segments with public domain software. **Communications in Soil and Plant Analysis**, **26**:459-468, 1995.
- FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, **14**:141-147, 1979.
- FAO. **FAO statistical database**. <http://apps.fao.org>. Consultada em 27/08/2000.
- FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, **40**:503-537, 1989.

- FARQUHAR, G. D.; O'LEARY, M. H.; BERRY, J. A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, **9**:121-137, 1982.
- FENG, M. J.; JIAN, Z. S.; FENG, L. X.; TAKEDA, K.; MATSUMOTO, H. A rapid hydroponic screening for aluminium tolerance in barley. **Plant and Soil**, **191**:133-137, 1997.
- FENG, M. J.; SYUNTARO, H.; HIDEAKI, M. High aluminium resistance in buckwheat: II. Oxalic acid detoxifies aluminium internally. **Plant Physiology**, **117**:753-759, 1998.
- FIDALSKI, J.; PAVAN, M. A.; AULER, P. A. M.; JACOMINO, A. P. Producao de frutos de laranjeira pera e teores de nutrientes nas folhas e no solo, em Latossolo Vermelho-Escuro do noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **23**:273-279, 1999.
- FNP. **Laranja: área colhida**. <http://www.fnp.com.br>. Consultada em 27/08/2000.
- FOY, C. D. Effects of aluminium on plant growth. In: CARSON, E. W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: Virginia University Press, 1974. p.601-642.
- FOY, C. D. Plant adaptation to acid, aluminium-toxic soils. **Communications in Soil and Plant Analysis**, **19**:959-987, 1988.
- FOY, C. D.; FLEMING, A. L. Aluminum tolerances of two wheat genotypes related to nitrate reductase activities. **Journal of Plant Nutrition**, **5**:1313-1333, 1982.
- FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, **29**:511-566, 1978.
- FOY, C. D.; CARTER, T. E.; DUKE, J. A.; DEVINE, T. E. Correlation of shoot and root growth and its role in selecting for aluminium tolerance in soybean. **Journal of Plant Nutrition**, **16**:305-325, 1993.
- FRÁGUAS, J. C. Tolerância de porta-enxertos de videira ao alumínio do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, **34**:1193-1200, 1999.
- FRÁGUAS, J. C.; do AMARAL, F. A. L.; BRAGA, J. M.; CARDOSO, A. A. Tolerância de porta-enxertos de videira (*Vitis* spp.) à saturação de alumínio. **Revista Ceres**, **203**:13-26, 1989.
- FREEDEN A. L.; RAO, I. M.; TERRY, N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glicine max*. **Plant Physiology**, **89**:225-230, 1989.

- FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. G. Tolerância a alumínio e eficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. **Bragantia**, **50**:331-340, 1991.
- FURLANI, P. R.; HANNA, L. G. Avaliação da tolerância de plantas de arroz e milho ao alumínio em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **8**:205-208, 1984.
- GINTING, S.; JOHNSON, B. B.; WILKENS, S. Alleviation of aluminium phytotoxicity on soybean growth by organic anions in nutrient solutions. **Australian Journal of Plant Physiology**, **25**:901-908, 1998.
- GODBOLD, D. L.; JENTSCHKE, G. Aluminium accumulation in root cell walls coincides with inhibition of root growth but not with inhibition of magnesium uptake in Norway spruce. **Physiologia Plantarum**, **102**:553-560, 1998.
- GOMES, M. M. S, CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; ESTEVÃO M. M. Aluminium effects on uptake and translocation of nitrogen in sorghum (*Sorghum bicolor*, L. Moench). **Journal of Plant Nutrition**, **8**:457-465, 1985.
- GONÇALVES, J. F. C.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; PACHECO, S. Aluminum and zinc effects on the metabolism of ribonucleic acid in two sorghum cultivars. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, **8**:81-86, 1996.
- GORANSSON, A. Growth and nutrition of small *Betula pendula* plants at different relative addition rates of manganese. **Tree Physiology**, **14**:375-388, 1994.
- HAMPP, R.; SCHNABL, H. Effect of aluminium ions on ¹⁴CO₂-fixation and membrane system of isolated spinach chloroplasts. **Z. Pflanzenphysiologie**, **76**: 300-306, 1975.
- HAVAUX, M.; LANNOYE, R. Chlorophyll fluorescence induction: a sensitive indicator of water stress in maize plants. **Irrigation Science**, **4**:257-263, 1983.
- HAVAUX M.; LANNOYE, R. *In vivo* chlorophyll fluorescence and delayed light emissions as rapid screening techniques for stress tolerance in crop plants. **Z. Pflanzenzücht**, **95**:1-13, 1985.
- HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. The interaction between silicon and aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: growth analysis and X-ray microanalysis. **Annals of Botany**, **72**:389-400, 1993.
- HORST, W. J.; ASHER, C. J.; CAKNAK, I.; SZULKIEWIWCZ, P.; WISSEMEIER, A. H. Short term response of soybean to aluminium. **Journal of Plant Physiology** **140**:174-178, 1992.

- HORST, W. J.; PÜSCHEL, A. K.; SCHMOHL, N. Induction of callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminium sensitivity in maize. **Plant and Soil**, **192**:23-30, 1997.
- HOWELER, R. H.; CADAVID, L. F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al-toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. **Agronomy Journal**, **68**:551-555, 1976.
- HUANG, J. W.; GRUNES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminium effects on calcium uptake and translocation in wheat forages. **Agronomy Journal**, **85**:867-873, 1993.
- HUANG, J. W.; GRUNES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminum effects on the kinetics of calcium uptake into cells of the wheat root apex. Quantification of calcium fluxes using a calcium-selective vibrating microelectrode. **Planta**, **188**:414-421, 1992.
- HUNT, H. **Basic growth analysis**. Londres: Unwin Hyman, 1990. 112 p.
- HUSAINI, Y.; RAI, L. C. pH dependent aluminium toxicity to *Nostoc linckia*: studies on phosphate uptake, alkaline and acid phosphatase activity, ATP content, photosynthesis and carbon fixation. **Journal of Plant Physiology**, **139**:703-707, 1992.
- IEZZONI, A. F.; PRITTS, M. P. Applications of principal component analysis to horticultural research. **HortScience**, **26**:334-338, 1991.
- IZUTA, T. Ecophysiological responses of Japanese forest tree species to ozone, simulated acid rain and soil acidification. **Journal of Plant Research**, **111**:471-480, 1998.
- JACKSON, M. B. Are plant hormones involved in root to shoot communication?. **Advances in Botanical Research**, **19**:103-174, 1993.
- JARRELL, W. M.; BERVELY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, **34**: 197-224, 1981.
- JARVIS, S. C.; HATCH, D. J. The effects of low concentrations of aluminium on the growth and uptake of nitrate-N by white clovers. **Plant and Soil**, **95**:43-55, 1986.
- JIAN, Z. S.; FENG, M. J.; HIDEAKI, M. High aluminium resistance in buckwheat: I. Al-induced specific secretion of oxalic acid from root tips. **Plant Physiology**, **117**:745-751, 1998.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 816 p.

- JOSHI, S. C. Species specific diurnal changes in chlorophyll fluorescence in tropical deciduous and evergreen plants growing in the field during summer. **Photosynthetica**, **31**:549-557, 1995.
- KASPAR, T. C.; EWING, R. P. ROOTEDGE: software for measuring root length from desktop scanner images. **Agronomy Journal**, **89**:932-940, 1997.
- KATO, T. Nitrogen assimilation in citrus trees 1. Ammonium and nitrate assimilation by intact roots, leaves and fruits. **Plant Physiology**, **48**:416-420, 1980.
- KESER, M.; NEUBAUER, B. F.; HUTCHINSON, F. E. Differential aluminum tolerance of sugarbeet cultivars, as evidenced by anatomical structure. **Agronomy Journal**, **69**: 347-350, 1977.
- KESER, M.; NEUBAUER, B. F.; HUTCHINSON, F. E. Influence of aluminum ions on developmental morphology of sugarbeet roots. **Agronomy Journal**, **67**:84-88, 1975.
- KINRAIDE T. B.; PARKER, D. R. Cation amelioration of aluminium toxicity in wheat. **Plant Physiology**, **83**: 546-551, 1987.
- KINRAIDE, T. B. Reconsidering the rhizotoxicity of hydroxyl, sulphate, and fluoride complexes of aluminium. **Journal of Experimental Botany**, **48**:1115-1124, 1997.
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanism of aluminium toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, **46**:237-260, 1995.
- KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. San Diego: Academic Press, 1997. 411p.
- KRAUSE G. H.; WEISS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, **42**: 313-349, 1991.
- KRIEDEMANN, P. E. Crop energetic and horticulture. **HortScience**, **6**:432-438, 1971.
- LASÁK, D. Chlorophyll *a* fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta**, **1412**:1-28, 1999.
- LAZOF, D. B.; RINCÓN, M.; RUFTY, T. W. MACKOWN, C. T.; CARTER, T. E. Aluminium accumulation and associated effects on ¹⁵NO₃⁻ influx in roots of two soybean genotypes differing in Al tolerance. **Plant and Soil**, **164**:291-297, 1994.

- LEE, C. H. Effects of Al and Mn on growth, nutrient status and gas exchange rates of *Pinus densiflora* seedlings hydroponically grown in nutrient culture solution. **FRI Journal of Forest Science**, **59**:91-104, 1998.
- LEITE JUNIOR, R. P. Cultivares de copa e porta-enxertos. In: IAPAR. **A citricultura no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1992. p.91-116.
- LICHTENTHALER, H. K. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. **Journal of Plant Physiology**, **148**:4-14, 1996.
- LICHTENTHALER, H. K.; BURKART, S.; SCHINDLER, C.; STOBER, F. Changes in photosynthetic pigments and in vivo chlorophyll fluorescence parameters under photoinhibitory growth conditions. **Photosynthetica**, **27**:343-353, 1992.
- LICHTENTHALER, H. K.; RINDERLE, U. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. **CRC Critical Review in Analytical Chemistry**, **19**:S29-S85, 1988.
- LIDON, F. C.; RAMALHO, J. C.; BARREIRO, M. G. Aluminium modulation of the photosynthetic carbon reduction cycle in *Zea mays*. **Photosynthetica**, **34**:393-400, 1997.
- LIN, Z.; MYHRE, D. L. Differential response of citrus rootstocks to aluminium levels in nutrient solutions: I. Plant growth. **Journal of Plant Nutrition**, **14**:1223-1238, 1991a.
- LIN, Z.; MYHRE, D. L. Differential response of citrus rootstocks to aluminium levels in nutrient solutions: II. Plant mineral concentrations. **Journal of Plant Nutrition**, **14**: 1239-1254, 1991b.
- LINDBERG, S.; WINGSTRAND, G. Mechanisms of Cd²⁺ inhibition of (K⁺ + Mg²⁺) ATPase activity and K⁺(⁸⁶Rb⁺) uptake in young root of sugar beet (*Beta vulgaris*). **Physiologia Plantarum**, **63**:181-186, 1985.
- LITTELL, R. C.; MILLIKEN, G. A.; STROUP, W. W.; WOLFINGER, R. D. **SAS system for mixed models**. Cary: SAS Institute. 1996, 633 p.
- LLOYD, J.; SYVERTSEN, J. D.; KRIEDEMANN, P. E.; FARQUHAR, G. D. Low conductance for CO₂ diffusion from stomata to the sites of carboxylation in leaves of woody species. **Plant, Cell and Environment**, **15**: 873-899, 1992.
- LOREN-PLUCINSKA, G.; ZIEGLER, H. Changes in ATP levels in Scot pine needles during aluminium stress. **Photosynthetica**, **32**:141-144, 1996.
- LU, C.; VONSHAK, A. Characterization of PSII photochemistry in salt-adapted cells of cyanobacterium *Spirulina platensis*. **New Phytologist**, **141**:231-239, 1999.

- MacDONALD, T. L.; MARTIN, R. B. Aluminium ion in biological systems. **Trends in Biological Sciences**, **13**:15-19, 1988.
- MAGALHÃES, A. F. de J. Tolerância de porta-enxertos de citrus ao alumínio. **Revista Brasileira de Fruticultura**, **9(3)**:51-55, 1987.
- MAGGS, R.; ASHMORE, M.R. Growth and yield responses of Pakistan rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to O₃ and NO₂. **Environmental Pollution**, **103**:159-170, 1998.
- MALAVOLTA, E.; NETTO, A. V. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 153 p.
- MALKANTHI, D. R. R.; YOKOYAMA, K; YOSHIDA, T.; MORITSUGU, M.; MATSUSHITA, K. Effects of low pH and Al on growth and nutrient uptake of several plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, **41**:161-165, 1995.
- MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. Solar radiation conversion efficiency and growth of soybean plants treated with herbicides. **Ceres**, **259**:265-275, 1998.
- MARIENFELD, S.; LEHMANN, H.; STELZER, R. Ultrastructural investigations and EDX-analyses of Al-treated oat (*Avena sativa*) roots. **Plant and Soil**, **171**:167-173, 1995.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Londres: Academic Press, 1995. 889 p.
- MARSCHNER, H.; KIRBBY, E. A.; CAKMAK, I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. **Journal of Experimental Botany**, **47**:1255-1263, 1996.
- MASON, M. G. An investigation of reduction in wheat yields after use of a high level of ammonium sulphate for a number of years. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, **20**:210-219, 1980.
- MASSOT, N.; LLUGANY, M.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELO, J. Callose production as indicator of aluminium toxicity in bean cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, **22**: 1-10, 1999.
- MCCORMICK, L. H.; BORDEN, F. Y. The occurrence of aluminum phosphate precipitate in plant roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, **38**:931-934, 1974.
- McLAUGHLIN, S. B.; ANDERSEN, C. P.; EDWARDS, N. T.; ROY, W. K.; LAYTON, P. A. Seasonal patterns of photosynthesis and respiration of red spruce saplings from two elevations in declining southern Appalachian Mountain sites. **Canadian Journal of Forest Research**, **20**:485-495, 1990.

- MENDONÇA, R. M. N.; COELHO, A. F. S.; MARTINEZ, H. E. P.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G. Resposta de mudas de maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims. f. *flavicarpa* Deg.) cultivadas em solução nutritiva, a diferentes níveis de alumínio. **Revista Ceres**, **266**:357-370, 1999.
- MINOTTA, G; PINZAUTI, S. Effects of light and soil fertility on growth, leaf chlorophyll content, and nutrient use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. **Forest Ecology and Management**, **86**:61-71, 1996.
- MORIMURA, S.; MATSUMOTO, H. Effect of aluminium on some properties and template activity of purified pea DNA. **Plant Cell Physiology**, **19**:429-436, 1978.
- MOUSTAKAS, M., ELEFThERIOU, E. P.; OUZOUNIDOU, G. Short-term effects of aluminium at alkaline pH on the structure and function of the photosynthetic apparatus. **Photosynthetica**, **34**:169-177, 1997.
- MOUSTAKAS, M., OUZOUNIDOU, G.; ELEFThERIOU, E. P.; LANNOYE, R. Indirects effects of aluminium stress on the photosynthetic apparatus. **Plant Physiology and Biochemistry**, **34**: 553-560, 1996.
- MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G. Aluminium effects on photosynthesis and elemental uptake in an aluminium-tolerant and non-tolerant wheat cultivar. **Journal of Plant Nutrition** **18**:669-683, 1995.
- MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G. Increased non-photochemical quenching in leaves of aluminium-stressed wheat plants is due to Al⁺³-induced elemental loss. **Plant Physiology and Biochemistry**, **32**:527-532, 1994.
- MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; LANNOYE, R. Rapid screening for aluminium tolerance in cereals by use of the chlorophyll fluorescence test. **Plant Breeding** **111**:343-346, 1993.
- MUGWIRA, L. M.; PATEL, S. U.; FLEMING, A. L. Aluminum effects on growth and Al, Ca, Mg, K and P levels in triticale, wheat, and rye. **Plant and Soil**, **57**:467-470, 1980.
- NEOGY, M.; DATTA, J. K.; MUKHERJEE, S.; GORAI, A. K. Effect of aluminium on some physiological parameters and seed yield in mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek). **Indian Journal of Plant Physiology**, **4**:317-319, 1999.
- NICHOL, B. E.; OLIVEIRA, L. A.; GLASS, A. D. M.; SIDDIQI, M. Y. The effects of aluminium on the influx of calcium, potassium, ammonium, nitrate, and phosphate in an aluminium-sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare* L.) **Plant Physiology**, **101**:1263-1266, 1993.
- NOGUEIRA, S. dos S. S.; NAGAI, V.; CARELLI, M. L. C.; FAHL, J. I. Comportamento de porta-enxertos de citros em presença do alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, **24**:711-716, 1989.

- NOGUES, S.; ALEGRE, L.; ARAUS, J. L.; PEREZ-ARANDA, L.; LANNOYE, R. Modulated chlorophyll fluorescence and photosynthetic gas exchange as rapid screening methods for drought tolerance in barley genotypes. **Photosynthetica**, **30**:465-474, 1994.
- NUNES, M. A.; MATOS, C. M.; AZINHEIRA, H. G.; QUARTIN, V. L. Indirect effects of aluminium on photosynthesis and mineral concentration in triticales. In: MATHIS, P. **Photosynthesis: from light to biosphere**, Vol IV. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1995. p.713-716.
- OHKI, K. Photosynthesis, chlorophyll, and transpiration responses in aluminium stressed wheat and sorghum. **Crop Science**, **26**: 572-575, 1986.
- OLEKSYN, J.; KAROLEWSKI, P.; GIERTYCH, M. J.; WERNER, A.; TJOELKER, M. G.; REICH, P. B. Altered root growth and plant chemistry of *Pinus sylvestris* seedlings subjected to aluminum in nutrient solution. **Trees: Structure and Function**, **10**: 135-144, 1996.
- OLIVEIRA, J. B. Solos para citros. In: RODRIGUEZ, O.; VIEGAS, F. P.; AMARO, A. A. **Citricultura brasileira**, 2ª ed. Campinas: Fundação Cargil, v. 1, 1991. p.196-227.
- PAPAGEORGIU, G. Chlorophyll fluorescence: an intrinsic probe of photosynthesis. In: GOVINDJEE. **Bioenergetics of photosynthesis**. New York: Academic Press, 1975. p. 319-371.
- PAPERNIK, L. A.; KOCHIAN, L. V. Possible involvement of Al-induced electrical signals in Al tolerance in wheat. **Plant Physiology**, **115**:657-667, 1997.
- PAVAN, M. A, BINGHAM, F. T. Toxicity of aluminium to coffee seedling grown in nutrient solution. **Soil Science Society American Journal**, **46**:993-997, 1982.
- PETRY, C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; PESSOA, A. C. S.; CASSOL, L. C. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: II. Efeito nos parâmetros cinéticos de absorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **18**:69-72, 1994.
- PINTO, I. S. **Tolerância ao alumínio de cinco porta-enxertos de citros (*Citrus spp.*) cultivados em solução nutritiva**. Cruz das Almas: UFBA, 1999. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias)- Universidade Federal da Bahia, 1999.
- POLLE, E.; KONZAC, C. F.; KITTRICK, J. A. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. **Crop Science**, **18**:823-827, 1978.

- POMPEU JUNIOR, J. Porta-enxertos. In: RODRIGUEZ, O.; VIEGAS, F. P.; AMARO, A. A. **Citricultura brasileira**, 2ª ed. Campinas: Fundação Cargil, v. 1, 1991. p.264-280.
- POSCHENRIEDER, C.; GUNSÉ, B.; BARCELÓ, J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance and abscisic acid content in expanding bean leaves. **Plant Physiology**, **90**: 1365-1371, 1989.
- REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; TJOELKER, M. G. Relationship of aluminium and calcium to net CO₂ exchange among diverse Scots pine provenances under pollution stress in Poland. **Oecologia**, **97**:82-92, 1994.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminium toxicity. **New Phytologist**, **121**:499-513, 1992.
- RENGEL, Z. Uptake of aluminium by plant cells. **New Phytologist**, **134**:389-406, 1996.
- RENGEL, Z.; PIÑEROS, M.; TESTER, M. Transmembrane calcium fluxes during Al stress. **Plant and Soil**, **171**:125-130, 1995.
- RENGEL, Z.; ROBINSON, D.L. Aluminum effects on micronutrient uptake by annual ryegrass. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, **20**:253-269, 1989b.
- RENGEL, Z.; ROBINSON, D.L. Competitive Al³⁺ inhibition of net Mg²⁺ uptake by intact *Lolium multiflorum* roots. I. Kinetics. **Plant Physiology**, **91**:1407-1413, 1989a.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.
- RHEINHEIMER, D. S.; PETRY, C.; BISPO JUNIOR, J. R.; KAMINSKI, J. Alterações no sistema radicular e concentração de tremoço azul provocadas por alumínio. **Ciência Rural**, **22**:11-14, 1992.
- RIDOLFI, M.; GARREC, J. P. Consequences of an excess Al and a deficiency in Ca and Mg for stomatal functioning and net carbon assimilation of beech leaves. **Annals of Forest Science**, **57**:209-218, 2000.
- RUFTY, T. W.; MACKOWN, C. T.; LAZOF, D. B.; CARTER, T. E. Effects of aluminium on nitrate uptake and assimilation. **Plant, Cell and Environment**, **18**:1325-1331, 1995.
- RYAN, P. R.; KINRAIDE, T. B.; KOCHIAN, L. V. Al³⁺-Ca²⁺ interactions in aluminium rhizotoxicity. I. Inhibition of root growth is not caused by reduction of calcium uptake. **Planta**, **192**:98-103, 1994.

- SANDMANN, G.; SCHEER, H. Chloroplasts pigments: chlorophylls and carotenoids. In: RAGHAVENDRA, A. S. **Photosynthesis: a comprehensive treatise**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p.44-57.
- SANTOS, C.H.; GRASSI FILHO, H.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Níveis de alumínio e o desenvolvimento de porta-enxertos cítricos em cultivo hidropônico: I. Parâmetros biométricos. **Scientia Agrícola**, **56**:921-932, 1999a.
- SANTOS, C.H.; GRASSI FILHO, H.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Níveis de alumínio e acúmulo de macronutrientes em porta-enxertos cítricos em cultivo hidropônico. **Scientia Agrícola**, **56**:1165-1175, 1999b.
- SANTOS, C.H.; GRASSI FILHO, H.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Influência de diferentes níveis de alumínio no acúmulo de micronutrientes em plantas de dois porta-enxertos cítricos em condições de cultivo hidropônico. **Acta Scientiarum**, **21**:511-517, 1999c.
- SANZONOWICZ, C.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W. Hydrogen and aluminium inhibition of soybean root extension from limed soil into acid subsurface solutions. **Journal of Plant Nutrition**, **21**:387-403, 1998.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User's Guide: Version 8**. Cary: SAS Institute Inc., 1999. 3.809 p.
- SHUMAN, L. M.; WILSON, D. O. Influence of phosphate and hydroxyl ions on Al toxicity in soybean and wheat. **Journal of Plant Nutrition**, **17**:345-365, 1994.
- 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**, **17**:293-306, 1994a.
- SIMON, L.; SMALLEY, T. J.; JONES, J. B.; LASSEIGNE, F. T. Aluminium toxicity in tomato. Part 2. Leaf gas exchange, chlorophyll content, and invertase activity. **Journal of Plant Nutrition**, **17**: 307-311, 1994b.
- SOMERS, D. J.; BRIGGS, K. G.; GUSTAFSON, J. P. Aluminum stress and protein synthesis in near isogenic lines of *Triticum aestivum* differing in aluminum tolerance. **Physiologia Plantarum**, **97**:694-700, 1996.
- STEVENS, M. M.; FOX, K. M.; WARREN, G. N.; CULLIS, B. R.; COOMBES, N. E.; LEWIN, L. G. An image analysis technique for assessing resistance in rice cultivars to root-feeding chironomid midge larvae (Diptera: Chironomidae). **Field Crops Research**, **66**:25-36, 2000.

- STEWART, D. P. C.; CAMERON, K. C.; CORNFORTH, I. S.; SEDCOLE, J. R. Effects of spent mushroom substrate on soil physical conditions and plant growth in an intensive horticultural system. **Australian Journal of Soil Research**, **36**: 899-912, 1998.
- STOBART, A.K.; GRIFFITHS, W.T.; BUKHARI, J.A., SHERWOOD, R.P. The effect of Cd ²⁺ on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. **Physiologia Plantarum**, **63**:293-298, 1985.
- SYVERTSEN, J. P. Light acclimation in citrus leaves. II. Assimilation and light, water and nitrogen efficiency. **Journal of American Society for Horticultural Sciences**, **109**:812-817, 1984.
- SYVERTSEN, J. P.; LLOYD, J. CO₂ assimilation of *Citrus* leaves: from mesophyll conductance to gross primary productivity of seedlings in different climates. **Acta Horticulturae**, **416**:147-154, 1997.
- TALEB, H. B.; LANNOYE, R.; LEDENT, J. F. Study of the effects of aluminium toxicity and calcium deficiency on photosynthesis. In: MATHIS, P. **Photosynthesis: from light to biosphere**, Vol IV. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1995. p.681-684.
- TAKELE, A.; McDAVID, C. R. Effects of short-term waterlogging on cultivars of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Tropical Agriculture**, **71**:275-280, 1994.
- TAYLOR, G. J. Current views of the aluminium stress response: the physiological basis of tolerance. **Current Topics in Plant Biochemistry and Physiology**, **10**:57-93, 1991.
- TAYLOR, G. J. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminium resistance. **Plant and Soil**, **171**:89-103, 1995.
- THORNLEY, J. H. M. A balanced quantitative model for root:shoot ratios in vegetative plants. **Annals of Botany**, **36**:431-441, 1972.
- TICE, K. R.; PARKER, D. R.; DEMASON, A. Operationally defined apoplastic and symplastic aluminum fractions in root tips of aluminum-intoxicated wheat. **Plant Physiology**, **100**:309-318, 1992.
- VALENCIA, R. A. Efectos del aluminio sobre el crecimiento de genotipos de maiz (*Zea mays* L.) tolerantes y susceptibles. **Revista ICA (Colombia)**, **27**: 255-268, 1992.
- VASCONCELLOS, L. A. B. Z.; SIMAO, S.; MALAVOLTA, E.; CARMELLO, Q. A. C.; PREZOTO, M. E. M. Comportamento de porta-enxertos de citros (*Citrus* spp.) em três tipos de solos com diferentes níveis de alumínio e manganês. **Laranja**, **10**:281-295, 1989.

- VAN, H.; KURAISHI, S.; SAKURAI, N. Aluminum-induced rapid root inhibition and changes in cell-wall components of squash seedlings. **Plant Physiology**, **106**:971-976, 1994.
- WAGATSUMA, T. Characterization of absorption sites for aluminum in the roots. **Soil Science and Plant Nutrition**, **29**:499-515, 1983.
- WAHID, A.; MASOOD, I.; JAVED, I.; RASUL, E. Phenotypic flexibility as marker of sodium chloride tolerance in sunflower genotypes. **Environmental and Experimental Botany**, **42**: 85–94, 1998.
- WALKER, R. R.; BLACKMORE, D. H.; QING, S. Carbon dioxide assimilation and foliar ion concentration in leaves of lemon (*Citrus limon* L.) seedlings irrigated with NaCl or Na₂SO₄. **Australian Journal of Plant Physiology**, **20**:173-185, 1993.
- WHEELER, D.M. Relative aluminium tolerance of ten species of Gramineae. **Journal of Plant Nutrition**, **18**:2305-2312, 1995.
- WUGWIRA, L. M.; ELGAWHARY, S. M.; PATEL, K. I. Differential tolerances of triticale, wheat, rye, and barley to Al in nutrient solution. **Agronomy Journal**, **68**:782-786, 1976.
- WUTSCHER, H. K. Citrus rootstocks. **Horticultural reviews**, **1**:237-269, 1979.
- WUTSCHER, H. K.; SMITH, P. F. Citrus. In: BENNET, W. F. **Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants**. St. Paul: APS PRESS, 1993. p.165-170.
- YAMAMOTO, Y.; KOBAYASHI, Y.; MATSUMOTO, H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. **Plant Physiology**, **125**:199–208, 2001.
- YAN, F.; SCHUBERT, S.; MENGEL, K. Effect of low root medium pH on net proton release, root respiration, and root growth of corn (*Zea mays* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.). **Plant Physiology**, **99**:415-421, 1992.
- YERMIYAHU, U.; RYTWO, G.; BRAUER, D. K.; KINRAIDE, T. B. Binding and electrostatic attraction of lanthanum (La³⁺) and aluminium (Al³⁺) to wheat root plasma membranes. **Journal of Membrane Biology**, **159**:239-252, 1997.
- ZEIFNEJAD, M.; CLARK, R. B.; RITCHEY, K. D.; BALIGAR, V. C.; PARRISH, D. J. Growth, photosynthesis, and water relations of wheat grown on acid soil amended with coal combustion by-products. **Crop Science**, **36**:968-974, 1996.

- ZAIFNEJAD, M.; CLARK, R. B.; SULLIVAN, C. Y. Aluminum and water stress effects on growth and proline of sorghum. **Journal of Plant Physiology**, **150**:338-344, 1997.
- ZHANG, G.; TAYLOR, G. J. Kinetics of aluminum uptake by excised roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive cultivars of *Triticum aestivum* L. **Plant Physiology**, **91**:1094-1099, 1989.
- ZHAO, X. J.; SUCOFF, E. I.; STADELMANN, E. J. Al³⁺ and Ca²⁺ alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. **Plant Physiology**, **83**:159-162, 1987.

APÊNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A – Resumo da análise de variância da relação F_v/F_0 , como exemplo da análise feita para todas as demais características avaliadas

a) Análise inicial

FV	GL	QM	F
Bloco	3	7,59591	9,63
Concentrações de alumínio (Al)	4	10,75482	13,64 **
Resíduo (a)	12	0,78802	
Porta-enxertos (PE)	3	11,06414	19,11 **
Al*PE	12	0,45849	0,79
Resíduo (b)	45	0,57900	

** : Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

b) Desdobramento dos graus de liberdade

FV	GL	QM	F
Al / PE	(16)	3,03258	
Al linear / CR	1	20,09287	31,83 **
Al quad. / CR	1	0,28041	0,44
Al cúb. / CR	1	0,04396	0,07
Al quart. / CR	1	0,34372	0,54
Al linear / SK	1	7,96399	12,62 **
Al quad. / SK	1	0,44072	0,70
Al cúb. / SK	1	0,40981	0,65
Al quart. / SK	1	1,65160	2,62
Al linear / VL	1	11,66782	18,48 **
Al quad. / VL	1	0,28491	0,45
Al cúb. / VL	1	0,02425	0,04
Al quart. / VL	1	0,09187	0,15
Al linear / CL	1	4,88872	7,74 **
Al quad. / CL	1	0,32557	0,52
Al cúb. / CL	1	0,00090	0,00
Al quart. / CL	1	0,01009	0,02
Resíduo combinado (Satterthwaite)	53,7	0,63126	
^a PE	(3)	1.454,14520	
^a CR vs VL	1	341,32006	1,42
^a SK vs CL	1	61,32234	0,25
^a LIM. vs TAN.	1	3.959,79319	16,43 **
^a Resíduo (b)	45	241,06203	

* : Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

PE = porta-enxertos ; CR = limoeiro 'Cravo' ; SK = tangerineira 'Sunki' ; VL = limoeiro 'Volkameriano' ; CL = tangerineira 'Cléopatra' ; LIM. = limoeiros ; TAN. = tangerineiras.

a = ANOVA baseada nos valores relativos em relação à testemunha.

Quadro 2A – Coeficientes de variação (%), nas parcelas (CVP) e nas subparcelas (CVSP), de características das trocas gasosas, da fluorescência e do teor de clorofila e do crescimento de planta

Características	CVP	CVSP
Taxa de fotossíntese líquida	40,7	37,4
Concentração interna de CO ₂	6,1	4,8
Condutância estomática	46,2	37,0
Taxa transpiratória	33,7	27,5
Eficiência do uso da água	37,8	28,1
Discriminação isotópica de carbono	3,2	2,7
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência inicial (F _v /F ₀)	18,2	21,2
Relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (F _v /F _m)	8,1	12,1
Área acima da curva de fluorescência	21,3	22,9
Teor de clorofila <i>a</i>	21,7	20,0
Teor de clorofila <i>b</i>	40,1	17,5
Teor de clorofila total	28,2	18,6
Taxa relativa de crescimento da massa de matéria fresca total da planta	21,2	18,4
Massa de matéria seca radicular	28,1	35,6
Área total do sistema radicular	33,8	35,5
Comprimento total do sistema radicular	28,5	37,4
Área foliar	38,1	72,8
Massa de matéria seca foliar	37,7	72,9
Massa de matéria seca do caule	28,6	44,0
Relação raiz parte aérea	15,6	28,9
Relação de área foliar	13,3	21,2
Relação de massa foliar	11,2	19,7

Quadro 3A – Coeficientes de variação (%), nas parcelas (CVP) e nas subparcelas (CVSP), de características da composição mineral na matéria seca do sistema radicular (-R) e da parte aérea (-PA)

Características	CVP	CVSP
N-R	12,0	4,4
N-PA	10,7	16,3
P-R	24,3	29,0
P-PA	21,1	16,9
K-R	40,5	41,8
K-PA	25,8	33,8
Ca-R	19,5	14,7
Ca-PA	23,0	7,8
Mg-R	25,2	12,6
Mg-PA	20,7	6,0
S-R	23,7	13,6
S-PA	26,2	11,9
Cu-R	24,1	23,5
Cu-PA	57,0	15,6
Fe-R	15,1	24,4
Fe-PA	44,5	36,5
Mn-R	24,5	24,9
Mn-PA	32,6	27,8
Zn-R	20,7	22,0
Zn-PA	27,0	19,8
Al-R	12,4	20,6
Al-PA	44,5	31,3