

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RELAÇÃO AMÔNIO E NITRATO, MITIGAÇÃO DA
TOXICIDADE AMONÍACAL COM SILÍCIO E CURVA DE
ACÚMULO DE NUTRIENTES EM MUDAS DE
MARACUJAZEIRO**

Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RELAÇÃO AMÔNIO E NITRATO, MITIGAÇÃO DA
TOXICIDADE AMONÍACAL COM SILÍCIO E CURVA DE
ACÚMULO DE NUTRIENTES EM MUDAS DE
MARACUJAZEIRO**

Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2015

Silva Júnior, Gabriel Barbosa da.
S586r Relação amônio e nitrato, mitigação da toxicidade amoniacal com
silício e curva de acúmulo de nutrientes em mudas de maracujazeiro /
Gabriel Barbosa da Silva Júnior. -- Jaboticabal, 2015
ix, 69 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015

Orientador: Renato de Mello Prado

Banca examinadora: Ítalo Herbert Lucena Cavalcante, Gustavo
Caione, Antonio Baldo Geraldo Martins, Aguinaldo José Freitas Leal
Bibliografia

1. *Passiflora edulis*. 2. Nitrogênio. 3. Proporções de NH_4^+ e NO_3^- .
4. Toxicidade. 5. Elemento benéfico. 6. Índices nutricionais. 7. Marcha
de acúmulo de nutrientes. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 634.77:631.84

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: RELAÇÃO AMÔNIO E NITRATO, MITIGAÇÃO DA TOXICIDADE AMONÍACAL COM SILÍCIO E CURVA DE ACÚMULO DE NUTRIENTES EM MUDAS DE MARACUJAZEIRO

AUTOR: GABRIEL BARBOSA DA SILVA JÚNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



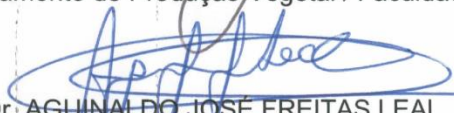
Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ANTONIO BALDO GERALDO MARTINS

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. AGUINALDO JOSÉ FREITAS LEAL

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ÍTALO HERBERT LUCENA CAVALCANTE

Universidade Federal do Vale do São Francisco / Petrolina/PE



Prof. Dr. GUSTAVO CAIONE

Universidade do Estado de Mato Grosso / Alta Floresta/MT

Data da realização: 10 de julho de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

GABRIEL BARBOSA DA SILVA JÚNIOR é natural de Palmeira do Piauí - PI, nascido em 15 de junho de 1987, filho de Gabriel Barbosa da Silva e Zilda Moreira de Oliveira Silva. É técnico em agropecuária pelo Colégio Agrícola de Bom Jesus (CABJ/UFPI), concluindo o ensino médio na mesma escola, em dezembro de 2005. É graduado em Engenharia Agrônômica em agosto de 2011, na Universidade Federal do Piauí - Câmpus Profa. Cinobelina Elvas (UFPI/CPCE). Realizou iniciação científica, atuando como PIBIC Voluntário de 2006 a 2008 e como bolsista PIBIC/CNPq durante o período de julho de 2008 a julho de 2011, atuando na área de adubação e nutrição de espécies frutíferas. Em março de 2012, na mesma instituição, iniciou o curso de Mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia (PPGFitotecnia) como bolsista da CAPES, por 14 meses, concluindo o curso em maio de 2013. Em agosto de 2013, ingressou no curso de Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, sendo bolsista do CNPq por 23 meses. Atua como é membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (GENPLANT), com participação em várias atividades e projetos de pesquisa na área de Nutrição de Plantas. É professor de Fruticultura do Departamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí, Câmpus Universitário Ministro Petrônio Portela, Teresina-PI.

*“Cada um de nós compõe a sua história,
cada ser em si carrega o dom de ser capaz, de ser feliz”.*

Almir Sater e Renato Teixeira

Aos meus amados pais, Gabriel e Zilda, por me ensinarem que a educação é a maior conquista que se pode oferecer para o filho;

Aos meus irmãos, Débora e Everaldo, pelo apoio, amor e carinho em todos os momentos;

À minha eterna namorada Samara, por me oferecer amor e carinho e por ser sempre paciente e compreensível.

OFEREÇO E DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela concessão da vida e pela alegria de viver em todos os momentos, pela saúde e pela força sempre oferecidas, e por ter tornado possível esta grande conquista.

Aos meus pais, Gabriel Barbosa da Silva e Zilda Moreira de Oliveira e Silva, pelo amor e carinho e pelos ensinamentos sempre oferecidos durante toda minha vida.

Aos meus amados irmãos Everaldo Moreira da Silva e Débora Moreira da Silva pelo companheirismo, afeto fraternal e amoroso e por serem minhas fontes de inspiração para que eu possa seguir pelos caminhos vitoriosos que Deus sempre nos ofereceu.

Aos meus queridos sobrinhos Kaio e Maria Gabriela, por serem minhas fortalezas, proporcionando-me força e determinação em todos os momentos, e ao meu cunhado Diones, pela convivência fraternal e amigável.

À minha namorada Samara Siqueira Pereira, pelo amor e carinho sempre concedidos e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela honra de poder receber sua orientação; pela excelente receptividade, presteza e paciência; pelo exemplo de profissional; pelos conhecimentos e incentivos concedidos durante todo o curso de doutorado; pela grande contribuição e dedicação para a realização deste trabalho. Meu sincero respeito e admiração!

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

Aos professores Rogério Falleiros Carvalho, William Natale, Antônio Baldo Geraldo Martins, Arthur Bernardes Cecílio Filho, Jairo Osvaldo Cazetta e Priscila Lupito Gratão, pelos ensinamentos concedidos ao longo das disciplinas e do curso.

A todos os componentes do GENPLANT, pela convivência e por compartilhar bons momentos, em especial: Luiz Cláudio Mancha, Cid Campos, Leandro Moda, Sylvia Letícia e Gilmara Pereira, pela amizade construída e pelas valiosas contribuições concedidas ao longo da realização deste trabalho.

Aos estimados amigos Wallace Leite, Luiz Cláudio Mancha, Fábio Leal, Cid Campos, Paulo Alexandre, Cláudio Barreto, Edwin Gutierrez, Joel Cabral, Alexson Dutra, Marcelo Barbosa, Leonardo Silva, Fernando Franco, Leandro Moda, Danilo Baldo, pela amizade fraterna, por sempre proporcionarem momentos que jamais serão esquecidos, pelos obstáculos enfrentados e por fazerem parte desta conquista. Guardarei comigo as lembranças das dificuldades e dos bons momentos compartilhados nesse período!

Aos amigos e membros do PROCAD, da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS/CPCS), Aguinaldo Leal, Rafael Barreto e Maria Júlia Troleis; e Ana Paula Barreto, da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Câmpus Vitória da Conquista, pela amizade e convivência, pelas trocas de experiências e pelas contribuições dadas a este trabalho.

Aos amigos e pesquisadores cubanos, Leónides Castellanos e Alejandro, pela participação na condução do experimento e das análises nutricionais, e pela amizade construída.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Cláudia, Célia, Marinêz, Mauro e Dejair, pela convivência diária e pela presteza.

À Dra. Ana Lúcia Borges, pesquisadora da Embrapa Cerrados, pela contribuição para a escolha da cultivar de maracujazeiro estudada neste trabalho.

Ao Prof. Vítório Barato Neto, da Faculdade de Educação São Luís de Jaboticabal, pela revisão gramatical do texto da tese, de acordo com as novas normas da língua.

Aos membros da banca de defesa da tese, Prof. Dr. Ítalo Herbert Lucena Cavalcante, Prof. Dr. Gustavo Caione, Prof. Dr. Antonio Baldo Geraldo Martins e Prof. Dr. Aguinaldo José Freitas Leal, pelas importantes contribuições oferecidas neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida para o curso de doutorado.

A todos, muito obrigado!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Fertilização nitrogenada em mudas de maracujazeiro.....	4
2.2 Concentrações de N e proporções de amônio e nitrato em plantas.....	4
2.3 Toxicidade de amônio em plantas.....	8
2.4 Fatores que podem aliviar o estresse por excesso de NH_4^+ em plantas.....	12
2.5 Silício na mitigação de estresses em plantas.....	13
2.6 Marcha de crescimento e de acúmulo de nutrientes em mudas de frutíferas.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Experimento I: Concentrações de nitrogênio e proporções de amônio e nitrato na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro.....	19
3.1.1 Delineamento experimental.....	19
3.1.2 Condições de crescimento das mudas.....	19
3.1.3 Variáveis analisadas.....	21
3.1.4 Análise estatística.....	22
3.2 Experimento II: Silício e toxicidade de amônio na fisiologia, na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro.....	22
3.2.1 Delineamento experimental.....	22
3.2.2 Condições de crescimento das mudas.....	23
3.2.3 Variáveis analisadas.....	24
3.2.4 Análise estatística.....	25
3.3 Experimento III: Taxa de crescimento relativo e marcha de acúmulo de nutrientes e silício em mudas de maracujazeiro.....	26
3.3.1 Delineamento experimental.....	26
3.3.2 Condições de crescimento das mudas.....	26
3.3.3 Variáveis analisadas.....	27
3.3.4 Análise estatística.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Experimento I: Concentrações de nitrogênio e proporções de amônio e nitrato na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro.....	30

4.1.1 Índice de cor verde e acúmulo de N, K, Ca e Mg.....	30
4.1.2 Crescimento, eficiência de uso do N e massa da matéria seca.....	34
4.2 Experimento II: Silício e toxicidade de amônio na fisiologia, na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro.....	39
4.2.1 Acúmulo de N, Si, K, Ca e Mg.....	39
4.2.2 Índice de cor verde e de vazamento de eletrólitos das folhas e fisiologia.....	42
4.2.3 Crescimento, eficiência de uso do N e massa da matéria seca.....	45
4.3 Experimento III: Taxa de crescimento relativo e marcha de acúmulo nutrientes e de silício em mudas de maracujazeiro.....	48
4.3.1 Acúmulo de nutrientes e de silício.....	48
4.3.2 Taxa de acumulação líquida organogênica e relativa de nutrientes e de Si.....	53
4.3.3 Crescimento, massa da matéria seca e taxa de crescimento relativo.....	55
5 CONCLUSÕES.....	59
6 REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICES.....	69
Apêndice A. Foto ilustrando a toxicidade de amônio na parte aérea (1A) e na raiz (2A) de mudas de maracujazeiro.....	69
Apêndice B. Foto ilustrando o efeito do Si na mitigação da toxicidade de amônio na parte aérea (1B), nas folhas (2B) e na raiz (2C) de mudas de maracujazeiro.....	69

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Classificação de espécies de plantas quanto à tolerância e à sensibilidade ao excesso de amônio, de acordo com vários autores...	9
Tabela 2. Concentrações dos nutrientes da solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^-	20
Tabela 3. Concentrações dos nutrientes da solução nutritiva em função das proporções de NH_4^+ e NO_3^- e da concentração de silício	23
Tabela 4. Resumo da análise de variância e resultados médios do índice de cor verde das folhas (ICV) e do acúmulo de N, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.....	30
Tabela 5. Acúmulo de N, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea (mg por planta) de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.....	32
Tabela 6. Resumo da análise de variância e resultados médios do diâmetro do caule, da área foliar, do comprimento da raiz, da eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) e da matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.....	35
Tabela 7. Resumo da análise de variância e resultados médios do acúmulo de N, de Si, de K, de Ca e de Mg na matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva.....	40
Tabela 8. Resumo da análise de variância e resultados médios do índice de cor verde das folhas (ICV), do índice de vazamento de eletrólitos (IVE), da concentração interna de CO_2 , da transpiração, da condutância estomática e da fotossíntese das folhas de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva.....	42
Tabela 9. Resumo da análise de variância e resultados médios da altura de plantas, do diâmetro do caule, da área foliar, do comprimento da raiz e da eficiência de uso do N (EUN), e matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro em função de proporções de NH_4^+	45

e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva.....

Tabela 10. Resumo da análise de variância do acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Cu e Si na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.....	49
Tabela 11. Taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) e taxa de acumulação relativa (TARN) de N, P, K, Ca, Mg e S na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.....	53
Tabela 12. Taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) de B, Zn, Mn, Fe, Cu e Si na raiz, no caule e nas folhas e taxa de acumulação relativa (TARN) na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.....	54
Tabela 13. Resumo da análise de variância e resultados médios da altura de plantas, do diâmetro do caule, do comprimento de raiz e da massa da matéria seca da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.....	55
Tabela 14. Taxa de crescimento relativo (TCR) da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de grau-dia.....	57

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento I.. 21
- Figura 2.** Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento II. 24
- Figura 3.** Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) na casa de vegetação, em função do período de graus-dia acumulados durante o desenvolvimento do experimento III..... 27
- Figura 4.** Índice de cor verde das folhas em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva (A), e acúmulo de N total na raiz e na parte aérea das mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N (B) (média das proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^-). *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F..... 31
- Figura 5.** Diâmetro do caule, em função de concentrações de N (A) e proporções de NH_4^+ (B), área foliar, em função de concentrações de N (C) e proporções de NH_4^+ (D) e comprimento das raízes de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva. * e ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F..... 36
- Figura 6.** Eficiência de utilização de nitrogênio na raiz e na parte aérea, em função de concentrações de N (A) e de proporções de NH_4^+ (B) e matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N (C) e de proporções de NH_4^+ (D) na solução nutritiva. *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F..... 37
- Figura 7.** Acúmulo de nitrogênio (A) e de silício (B) na matéria seca da raiz de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$)..... 41
- Figura 8.** Índice de cor verde (A) e índice de vazamento de eletrólitos (B) nas folhas de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$)..... 43

- Figura 9.** Diâmetro do caule (A), comprimento da raiz (B) eficiência de utilização de N na raiz (C) e matéria seca da raiz (D) de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$)..... 46
- Figura 10.** Acúmulo de N (A), P (B), K (C), Ca (D), Mg (E) e S (F) na raiz ($\diamond$), no caule ($\blacksquare$), nas folhas (∇) e na planta inteira ($\bullet$) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. *, ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F..... 50
- Figura 11.** Acúmulo de B (A), Zn (B), Mn (C), Fe (D), Cu (E) e Si (F) na raiz ($\diamond$), no caule ($\blacksquare$), nas folhas (∇) e na planta inteira ($\bullet$) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. *, ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F..... 51
- Figura 12.** Altura de plantas (a), diâmetro do caule (b), comprimento de raiz (c) e massa da matéria seca (d) da raiz ($\diamond$), do caule ($\blacksquare$), das folhas (∇) e da planta inteira ($\bullet$) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. *, ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F 56

RELAÇÃO AMÔNIO E NITRATO, MITIGAÇÃO DA TOXICIDADE AMONIACAL COM SILÍCIO E CURVA DE ACÚMULO DE NUTRIENTES EM MUDAS DE MARACUJAZEIRO

RESUMO – Os estudos sobre a nutrição de mudas de maracujazeiro envolvendo a relação amônio e nitrato, a toxicidade amoniacal e a curva de acúmulo de nutrientes são incipientes na literatura. Diante disso, objetivou-se avaliar as proporções de amônio e nitrato, a interação entre o silício e o excesso de amônio, e o acúmulo de nutrientes e de Si durante a produção de mudas de maracujazeiro. O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação da UNESP, Jaboticabal-SP, no período de fevereiro a outubro de 2014, a partir de três etapas: Experimento I: os tratamentos seguiram esquema fatorial 4 x 5, constituído por quatro concentrações de nitrogênio: 2,5; 5,0; 10,0 e 20,0 mmol L⁻¹ e cinco proporções de amônio: 0; 25; 50; 75 e 100%, em relação ao nitrato, dispostos em delineamento em blocos casualizados, com três repetições. Avaliaram-se: índice de cor verde, acúmulo de N, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea; diâmetro do caule; área foliar; comprimento radicular, eficiência de uso de nitrogênio e massa da matéria seca da raiz e da parte aérea; Experimento II: os tratamentos seguiram esquema fatorial 2 x 2, correspondendo a duas proporções de amônio e nitrato (40/60%, sem excesso de amônio; e 75/25%, excesso de amônio), na ausência e na presença de Si, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Avaliaram-se: acúmulo de N, Si, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea, índice de cor verde das folhas, índice de vazamento de eletrólitos, concentração interna de CO₂, transpiração, condutância estomática, fotossíntese, diâmetro do caule, área foliar, comprimento radicular, eficiência de uso de nitrogênio e massa da matéria seca da raiz e da parte aérea; Experimento III) utilizou-se de sete tratamentos, constituídos pelos tempos de cultivo das mudas: 0; 10; 20; 30; 40; 50 e 60 dias após o transplântio, correspondendo a: 0; 175; 330; 585; 785; 980 e 1175 graus-dia, respectivamente, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. Em cada tempo de cultivo, foram avaliados: taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) e taxa de acumulação relativa (TARN) de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Cu e Si, altura de plantas, diâmetro do caule, comprimento de raiz, massa da matéria seca da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira, e taxa de crescimento relativo (TCR) das mudas. Para a formação de mudas de maracujazeiro, a solução nutritiva deve ter 13 mmol L⁻¹ de N, com 40% deste nutriente na forma de amônio. Para a formação de mudas de maracujazeiro, a solução nutritiva deve ter 13 mmol L⁻¹ de N, com 40% deste nutriente na forma de amônio. Portanto, infere-se que o maracujazeiro é uma planta tolerante ao amônio; no entanto, concentração crítica acima de 5,7 mmol L⁻¹ de NH₄⁺ na solução nutritiva diminui a absorção de cátions, a eficiência de utilização do nitrogênio e a produção de matéria seca. O fornecimento de Si em mudas de maracujazeiro sob excesso de amônio incrementa o acúmulo, a eficiência de uso do N, o comprimento e a matéria seca da raiz e o índice de cor verde das folhas, e diminui o índice de vazamento de eletrólitos das folhas, refletindo no aumento do diâmetro do caule. Portanto, pode-se inferir que o Si favorece a mitigação da toxicidade de amônio em maracujazeiro

durante a fase de produção de mudas. As maiores taxas de crescimento resultam em maiores acúmulos de nutrientes e de Si e no maior acúmulo organogênico destes elementos em mudas de maracujazeiro, atingindo o máximo no período de 786 a 980 graus-dia. Na fase inicial de crescimento, até 175 graus-dia, há alta taxa de acúmulo de N, K, Mg, Fe e Cu, indicando a importância desses elementos para a produção de mudas.

Palavras-chave: *Passiflora edulis*, nitrogênio, proporções de NH_4^+ e NO_3^- , toxicidade, elemento benéfico, índices nutricionais, marcha de acúmulo de nutrientes

AMMONIUM AND NITRATE RELATIONSHIP, MITIGATION OF AMMONIACAL TOXICITY WITH SILICON AND NUTRIENT ACCUMULATION CURVE IN PASSION FRUIT SEEDLINGS

ABSTRACT – Studies on yellow passion fruit seedlings nutrition involving ammonium nitrate proportions and the ammonium toxicity and nutrient accumulation curve are incipient in the literature. In this sense, aimed to evaluate: ammonium nitrate proportions, the interaction between silicon and ammonium excess and the accumulation of nutrients and Si during the growing of yellow passion fruit seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse at São Paulo State University, Jaboticabal, from February to October, 2014, starting at three steps: First experiment: the treatments followed a 4 x 5 factorial design, consisting of four nitrogen concentrations: 2.5; 5.0; 10.0 and 20.0 mmol L⁻¹ and five ammonium proportions: 0; 25; 50; 75 and 100%, relative to nitrate, arranged in a randomized block design with three replications. It was evaluated: green color index, nitrogen, potassium, calcium and magnesium accumulation in roots and shoots, stem diameter, leaf area, root length and nitrogen use efficiency and dry matter of root and shoot. Second experiment: the treatments followed a 2 x 2 factorial design, corresponding to two proportions of ammonium and nitrate (40/60%, without excess ammonium; and 75/25%, excess ammonium) in the absence and presence of Si, arranged in completely randomized design, with five repetitions. It was evaluated: N, Si, K, Ca and Mg accumulation in the root and shoot; leaves green color index; electrolyte leakage rate, internal CO₂ concentration, transpiration, stomatal conductance, photosynthesis, stem diameter, leaf area, root length, nitrogen use efficiency and dry matter of root and shoot; Third experiment: It was used seven treatments, consisting of the seedling cultivation times: 0; 10; 20; 30; 40; 50, corresponding to 0; 175; 330; 585; 785; 980 and 1175 degrees day, respectively, arranged in a completely randomized design, with eight replications. In each time of cultivation were evaluated: organogenic net accumulation rate (TALON) and relative rate of accumulation (TARN) of N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Cu and Si, plant height, stem diameter, root length, root, stem, leaves and whole plant dry matter and relative growth rate (RGR) of seedlings. For the formation of yellow passion fruit seedlings, the nutrient solution should be 13 mmol L⁻¹ of N, with 40% of this nutrient in the ammonium form. Therefore, it is inferred that the passion fruit is a tolerant plant to ammonium; however, critical concentration above 5.7 mmol L⁻¹ of NH₄⁺ in the nutrient solution decreases the cations uptake, the nitrogen use efficiency and dry matter production. The supply of Si in yellow passion fruit seedlings under excess ammonium increases the N accumulation, the N use efficiency, length and dry matter of root and green color index of leaves and decreases the leaves of electrolyte leakage rate, reflecting in the increased stem diameter. Therefore, it can be inferred that the Si favors the mitigation of ammonium toxicity in passion fruit during seedling production. The highest growth rates result in larger accumulation of nutrients and Si and the higher organogenic accumulation of these elements in passion fruit seedlings, peaking in the period 786-980 degree days. The early stage of growth, up to 175 degree days,

there is high rate of N, K, Mg, Fe and Cu, accumulation, indicating the importance of these elements for the production of seedlings.

Keywords: *Passiflora edulis*, nitrogen, NH_4^+ and NO_3^- proportions, toxicity, benefic element, nutritional index, nutrient accumulation rate

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se expandido o cultivo de mudas frutíferas, como o maracujazeiro, em recipientes com substrato inerte, com o uso de solução nutritiva. Neste sistema, o nitrogênio é o nutriente mais absorvido e mais limitante, tanto pelo excesso quanto pela deficiência. Dessa forma, o conhecimento da concentração de N adequada e da proporção de nitrato e amônio, na solução nutritiva, é importante para otimizar a eficiência nutricional com reflexos na qualidade da muda do maracujazeiro.

A assimilação de N na forma de NH_4^+ pelas plantas requer menor consumo de energia, devido a sua incorporação direta na cadeia de carbono, sem a necessidade das fases de redução pela ação enzimática, com gasto de energia, como ocorre para o NO_3^- (BITTSÁNSZKY et al., 2015), podendo incrementar a eficiência de uso do mesmo (SARASKETA et al., 2014). Entretanto, apesar da importância do suprimento de N para as plantas, ainda existem dúvidas sobre a relação ótima de amônio e nitrato no meio de cultivo, embora haja resultados preliminares, reportados por Britto e Kronzucker (2002), bem como, por Li, Wang e Stewart (2013).

Estes estudos sobre a relação ótima de amônio e nitrato podem contribuir para a melhoria da qualidade das mudas de maracujazeiro e diminuir o tempo de cultivo das mesmas. Entretanto, é conhecido que o excesso de amônio pode induzir a toxicidade, o que é motivo de preocupação quanto ao manejo adequado da solução nutritiva para a produção de mudas.

Os estudos sobre tolerância à toxicidade de amônio são conhecidos em algumas espécies, não tendo sido encontrados estudos com o maracujazeiro. No entanto, essa frutífera, por ser considerada rústica (LENZA et al., 2009), supostamente poderia ser tolerante ao amônio, pois deve apresentar estratégias aos eventuais estresses oxidativos.

Nas plantas, o excesso de amônio provoca a redução do pH citoplasmático e a ativação de espécies reativas de oxigênio, relacionadas com injúrias à membrana plasmática e à estrutura da parede celular (LI et al., 2014) e também diminui a absorção de K, Ca e Mg (BORGOGNONE et al., 2013), podendo provocar prejuízos à produção de biomassa.

Neste sentido, algumas estratégias podem ser adotadas para minimizar o efeito tóxico do NH_4^+ às plantas, podendo ser destacado o uso de elementos benéficos, como o silício (Si). Apesar de o silício não ser considerado um nutriente de plantas (EPSTEIN, 2009), esse elemento pode aumentar a tolerância de plantas a estresses abióticos, como o excesso de nitrogênio (BYBORDI, 2010), e atenuar efeitos causados por distúrbios nutricionais (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014).

O efeito benéfico do Si em plantas sob condições de estresse ocorre devido ao estímulo dos sistemas antioxidantes, com aumento da integridade física das membranas (KOCHANOVÁ et al., 2014), da atividade fotossintética (VACULÍKOVÁ et al., 2014) e do equilíbrio nutricional (CHEN et al., 2011), com reflexos no aumento da produção de matéria seca, especialmente nas raízes das plantas.

Existem indicações do efeito do silício na mitigação da toxicidade de amônio em plantas, em alguns estudos, tendo relatos em *Brassica napus* (BYBORDI, 2010); em *Cucumis sativus* (Campos, 2013), e em *Saccharum spp* (CAMPOS, 2013; KEEPING et al., 2015); mas existem dúvidas sobre o papel do silício na nutrição e no órgão da planta mais beneficiado sob estresse. No entanto, em mudas de frutíferas, como o maracujazeiro, ainda não existem relatos na literatura sobre a relação de silício e a toxicidade de amônio.

Além de conhecer os aspectos da nutrição nitrogenada, abordada anteriormente, estudos complementares sobre a curva de acúmulo de nutrientes e de Si são importantes, visando fornecê-los nas épocas mais requeridas pelas mudas, atendendo suas exigências nutricionais e com reflexos em sua qualidade.

As pesquisas sobre a curva de acúmulo de nutrientes, especialmente avaliando os índices nutricionais e as taxas de crescimento relativo, ainda são pouco exploradas, tendo um trabalho de Fey et al. (2009), que estudaram o acúmulo de nutrientes em plantas cultivadas em solo, ao longo dos dias de cultivo. Observa-se que são incipientes os estudos sobre esse tema em mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato inerte, com o uso de solução nutritiva e considerando, ao invés de dados cronológicos, a exigência térmica diária das plantas, expressa pelo acúmulo de graus-dia, pois é a soma térmica que induz o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais.

Dessa forma, há a necessidade de maiores investigações sobre os temas abordados na área da nutrição de mudas de maracujazeiro, surgindo algumas hipóteses a serem testadas: (a) a fertilização nitrogenada com proporções equilibradas entre NH_4^+ e NO_3^- incrementa a absorção de N e sua eficiência de uso, com reflexos na qualidade de mudas de maracujazeiro; (b) a presente frutífera pode ser considerada uma espécie tolerante ao amônio; (c) a toxicidade de amônio em mudas de maracujazeiro pode ser mitigada com o fornecimento de Si; (d) o acúmulo de nutrientes e de silício nas mudas de maracujazeiro é influenciado pela taxa de crescimento e pela quantidade de graus-dia acumulados.

Diante do exposto, objetivaram-se avaliar as proporções de amônio e nitrato, a toxicidade amoniacal e o acúmulo de nutrientes e de silício pelas mudas de maracujazeiro. Para isto, realizaram-se experimentos tendo os seguintes objetivos específicos: i) avaliar a interação entre concentrações de nitrogênio e proporções de amônio e nitrato sobre a nutrição e a produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro; ii) avaliar a interação entre o silício e o excesso de amônio sobre a nutrição, a fisiologia, o crescimento e a produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro; e iii) avaliar o acúmulo, a taxa de acumulação líquida organogênica e relativa de nutrientes e de Si, e a taxa de crescimento relativo de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função da exigência térmica diária das plantas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fertilização nitrogenada em mudas de maracujazeiro

Para garantir a expansão do maracujazeiro-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.) como uma atividade economicamente viável, estudos sobre nutrição mineral dessa frutífera são fundamentais, considerando-se a importância dos nutrientes na produção das culturas. Assim, o sucesso na formação do pomar depende da qualidade da muda e de seu adequado estado nutricional, garantindo maior pegamento e homogeneidade das plantas, podendo apresentar reflexos na precocidade de produção do pomar (NATALE et al., 2006).

A utilização do nitrogênio no meio de cultivo estimula o crescimento e o desenvolvimento de mudas de frutíferas, especialmente de maracujazeiro (SANTOS et al., 2011). Entretanto, existem poucos estudos a respeito da nutrição e da adubação nitrogenada em mudas dessa frutífera, embora sejam práticas importantes para a implantação de pomares produtivos, fato relatado por diversos autores (PRADO et al., 2004; ALMEIDA et al., 2006; MENDONÇA et al., 2007a, b; SANTOS et al., 2011). Além disso, estes estudos foram realizados em substratos à base de solo, fornecendo-se o N em cobertura, prática que está em desuso pelos produtores de mudas dessa frutífera.

Atualmente, tem-se como alternativa o uso de substratos inertes para a produção de mudas frutíferas, com a possibilidade de se balancear os nutrientes e suas respectivas fontes, a exemplo do nitrogênio, fornecendo-se amônio e nitrato em concentrações equilibradas, com o uso de solução nutritiva. Entretanto, pesquisas nessa área ainda são pouco conhecidas, fato preocupante quando se objetiva obter mudas de maracujazeiro de alta qualidade, havendo, portanto, a necessidade de mais estudos.

2.2 Concentrações de N e proporções de amônio e nitrato em plantas

O crescimento das plantas é influenciado pelas formas de N, sendo variável com as espécies (HORCHANI, HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011) e com os genótipos

(CRUZ et al., 2011). A relação amônio e nitrato influencia o metabolismo do nitrogênio e a absorção de nutrientes (HELALI et al, 2010), a síntese de hormônios (Li et al., 2014) e a fotossíntese (BITTSÁNSZKY et al., 2015), com reflexos na produção de matéria seca das plantas.

Sabe-se que as espécies de plantas diferem quanto à preferência pelas formas de N amoniacal ou nítrica, porém uma nutrição balanceada de N, incluindo NH_4^+ e NO_3^- , pode promover rendimentos superiores das culturas em relação à disponibilidade de apenas uma das fontes nitrogenadas (BRITTO; KRONZUNKER, 2002).

Plantas de *Oryza sativa* cultivadas sob diferentes proporções de amônio e nitrato, na concentração de $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N, apresentaram maior crescimento de raiz quando foi utilizado somente nitrato no meio de cultivo (ZANIN et al., 2015). A preferência de 100% de N na forma nítrica, em relação ao amônio, também foi relatada em estudos com outras espécies como *Triticum aestivum* e *Solanum lycopersicum*, ambos com $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N (HORCHANI, HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011), e *Arabidopsis thaliana*, com $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N (SARASKETA et al., 2014).

Entretanto, outras pesquisas revelam melhor desenvolvimento das plantas com o fornecimento de amônio no meio de cultivo. Em estudos sobre o metabolismo do amônio e do nitrato em plantas de *Oryza sativa* (BALKOS et al., 2010) e de *Pisum sativum* (CRUZ et al., 2011), observou-se que com o fornecimento apenas de amônio, na concentração de 10 mmol L^{-1} , houve maior atividade fotossintética, e, conseqüentemente, maior produção de matéria seca da raiz e da parte aérea das plantas.

Avaliando os efeitos de fontes de N nítrica e amoniacal sobre variáveis fisiológicas e bioquímicas de plantas de *Cana indica*, Konnerup e Brix (2010) concluíram que as plantas apresentaram maiores taxas fotossintéticas com o suprimento de amônio, sugerindo uma preferência das plantas a esta fonte de N.

Outras espécies apresentaram crescimento adequado com proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ de 50/50%, porém com concentrações de N diferentes no meio de cultivo, a exemplo de *Brassica campestris*, com $5,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N (ZHANG et al., 2007); *Solanum tuberosum*, com $7,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N (ZEBARTH et al., 2012), e *Salvinia cucullata*, com $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N (JAMPEETONG, BRIX; KANTAWANICHKUL,

2012). Em todos esses trabalhos, verificaram-se maiores atividades metabólicas do complexo enzimático GS/GOGAT, responsáveis pela assimilação do N nas plantas, com maior crescimento dessas espécies.

Avaliando o crescimento de *Eucalyptus urophylla* em meio hidropônico, com diferentes proporções de amônio e nitrato, Guimarães Cairo e Neves (2014) relatam que a proporção 25/75%, na concentração de 7,8 mmol L⁻¹ de N, foi a que mais favoreceu o crescimento das plantas. Contudo, as proporções de NH₄⁺/NO₃⁻ não causaram alterações significativas na fotossíntese líquida e nas trocas gasosas. Em complemento, esses autores afirmam que as proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻ alteraram o pH da solução hidropônica, a atividade da redutase do nitrato e o acúmulo de cátions e ânions das plantas.

Em avaliação de plantas de *Eustoma grandiflorum*, Mendoza-Villareal et al. (2015) concluíram que, com o suprimento de 15 mmol L⁻¹ de N na proporção de 75% de NH₄⁺ em relação ao NO₃⁻ na solução nutritiva, houve incremento no acúmulo de N, K, Ca e Mg e na taxa fotossintética, aumentando a produção de matéria seca da raiz e da parte aérea das plantas.

Em estudos com plantas de *Spinacia oleracea* e *Pisum sativum* cultivadas com amônio e nitrato sob concentrações de 1,5 e 3 mmol, respectivamente, Domínguez-Valdivia et al. (2008) relataram que as respostas das plantas à nutrição amoniacal são distintas. Esses autores observaram também que as plantas de espinafre cultivadas sob excesso de amônio apresentaram redução no crescimento, em relação àquelas cultivadas com nitrato, entretanto, o mesmo não foi verificado para as plantas de ervilha.

Em cultivo de *Solanum lycopersicum* sob concentrações de amônio e de nitrato, Borgognone et al. (2013) verificaram menores acúmulos de Ca e de Mg, diminuição da atividade fotossintética e do crescimento das plantas, com o uso do N amoniacal.

Estudos em solução nutritiva com diferentes formas de nitrogênio relatam que o incremento do amônio em relação ao nitrato diminuiu a produção de diferentes espécies, como *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-VILLARREAL et al., 2015), *Eucalyptus urophylla* (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014), *Solanum lycopersicum* (BORGOGNONE et al., 2013), *Pisum sativum* (ARIZ et al., 2011), *Arabidopsis thaliana*

(HELALI et al., 2010) e *Cucumis sativus* (ROOSTA; SCHJOERRING, 2008; CAMPOS, 2013). Esses autores complementam que o amônio em concentrações elevadas provoca desequilíbrios nutricionais, evidenciando o efeito antagônico de NH_4^+ em relação à absorção de cátions inorgânicos, por serem íons catiônicos que competem fortemente pelos mesmos sítios de absorção.

Em estudos com proporções de N nítrico e amoniacal na nutrição de plantas de girassol, verificou-se que as plantas cultivadas com a maior proporção de NH_4^+ apresentaram redução no teor de clorofila, no comprimento e no volume de raiz e na matéria seca, em relação às plantas que foram cultivadas com maior proporção de nitrato (SILVA; COUTO; SANTOS, 2010).

Avaliando o crescimento e fisiologia de dois porta-enxerto de *Citrus reticulata* cultivadas em vermiculita sob diferentes proporções de amônio e nitrato, Dou, Alva e Bondada (1999), concluíram que o excesso de amônio causou toxicidade as mudas, com prejuízos a produção de matéria seca das plantas. Por outro lado, o fornecimento de nitrato em maiores proporções promoveu maior crescimento das mudas.

Com a utilização de N na forma de amônio e de nitrato como fontes de nitrogênio na micropropagação de *rubus spp.* cultivada *in vitro*, verificaram-se que o uso balanceado dessas formas de N promove adequado desenvolvimento das mudas, entretanto, concentrações elevadas de N no meio de cultivo são tóxicas às plântulas (VILLA et al., 2009).

Do mesmo modo, Choi, Latigui e Lee (2011) estudaram o crescimento e a absorção de nutrientes em plantas de *Fragaria spp.* em função de proporções de amônio em relação ao nitrato, supridos via solução nutritiva, com o uso de vermiculita. Neste estudo, concluíram-se que o uso de NO_3^- como a única fonte de N, resultou em maior crescimento vegetativo das plantas. Por outro lado, a utilização exclusiva de NH_4^+ na solução nutritiva suprimiu severamente o crescimento de plantas. A utilização das duas formas de N, 60/40% ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) resultou no maior acúmulo de macronutrientes na matéria seca da parte aérea das plantas.

Portanto, observa-se que o crescimento e o desenvolvimento das plantas são influenciados pela quantidade de N adicionada no meio de cultivo, bem como pela proporção de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ adotada. Além disso, essas respostas são dependentes das

espécies das cultivares utilizadas. Entretanto, não foram encontrados estudos sobre esse tema com o maracujazeiro amarelo.

2.3 Toxicidade de amônio em plantas

As espécies de plantas podem ser tolerantes ou não ao excesso de amônio no meio de cultivo, de modo que o efeito tóxico dessa forma de N influencia no crescimento e no desenvolvimento das plantas (CRUZ et al., 2011).

A absorção de N na forma amoniacal pode ter como vantagem o fato de o N estar na forma reduzida; no entanto, o fluxo de amônio é de difícil controle, devido à necessidade da homeostase celular do elemento, podendo induzir toxicidade às plantas (BITTSÁNZKY et al., 2015). Neste sentido, a maioria das plantas superiores desenvolve sintomas de toxicidade, quando cultivada apenas com amônio, podendo ocasionar a morte dos vegetais (HORCHANI; HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011).

Entretanto, as respostas que as plantas apresentam quando absorvem N amoniacal ou nítrico são muito amplas, mesmo sendo da mesma espécie, de maneira que há diferenças entre variedades quanto ao desenvolvimento sob aplicação de amônio (CRUZ et al., 2011) e de nitrato (HUANG et al., 2013).

Na literatura, existem indicações, para algumas espécies, em relação à tolerância e à sensibilidade ao NH_4^+ , de acordo com o desenvolvimento das plantas, em função das concentrações de amônio estudadas, segundo os respectivos autores (Tabela 1).

A toxicidade de amônio ocasiona mudanças bioquímicas e fisiológicas na planta, como: alterações no pH intracelular, no equilíbrio osmótico, no metabolismo de hormônios (LI et al., 2014), induz a deficiência de nutrientes (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015), aumenta o conteúdo de O_2^- e H_2O_2 , podendo causar estresse oxidativo, diminuir os teores de clorofila e de carotenoides (WANG et al., 2010) e as taxas fotossintéticas (SU et al., 2012; BORGOGNONE et al., 2013). De modo geral, os sintomas de toxicidade do NH_4^+ em plantas deve-se, entre outros fatores, ao alto consumo de energia para o efluxo desse íon, mantendo baixa sua concentração no citosol da célula (BRITTO et al., 2014).

Tabela 1. Classificação de espécies de plantas quanto à tolerância e à sensibilidade ao excesso de amônio, de acordo com vários autores.

Espécies tolerantes	Autores	Espécies sensíveis	Autores
<i>Oryza sativa</i>	Li et al. (2013) Balkos et al. (2010)	<i>Zea mays</i>	Simons et al. (2014)
<i>Saccharum</i> spp.	Ishikawa et al. (2009)	<i>Solanum lycopersicum</i>	Horchani, Hajri e Aschi-Smiti (2011)
<i>Solanum tuberosum</i>	Zebarth et al. (2012)	<i>Triticum aestivum</i>	Li et al. (2013) Horchani, Hajri e Aschi-Smiti (2011)
<i>Impomea</i> spp.	Li et al. (2013)	<i>Cucumis sativus</i>	Roosta et al. (2009) Ishikawa et al. (2009)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Guimarães, Cairo e Neves (2014)	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Sarasketa et al. (2014)
<i>Pisum sativum</i>	Ariz et al. (2010) Domínguez-Valdivia et al. (2008)	<i>Spinacia oleracea</i>	Lasa et al. (2001)
<i>Eustoma russellianum</i>	Mendoza-Villarreal et al. (2015)	<i>Beta vulgaris</i>	Li et al. (2013)
<i>Medicago sativa</i>	Horchani, Hajri e Aschi-Smiti (2011)	<i>Helianthus annuus</i>	Lasa et al. (2001)
<i>Lupinus albus</i>	Cruz et al. (2006)	<i>Brassica</i> spp.	Britto e Kronzucker (2002)
		<i>Lactuca sativa</i>	Horchani, Hajri e Aschi-Smiti (2011) Cruz et al. (2006)

Na literatura, vários trabalhos relatam os sintomas de toxicidade de amônio em plantas, como, clorose, necrose, murchamento das folhas, coloração marrom do sistema radicular, senescência, menor crescimento das raízes e da parte aérea, e em casos de toxicidade severa, podendo ocorrer morte do vegetal (LI et al., 2014; JAMPEETONG; BRIX; KANTAWANICHKUL, 2012; WONG, 2005).

O amônio em excesso pode causar danos à integridade física das membranas das células dos vegetais (KOCHANOVÁ et al., 2014), sendo relatada a aumento do índice de vazamento de eletrólitos em plantas de *Arabidopsis thaliana* (HELALI et al., 2010). Com isto, pode haver diminuição da atividade fotossintética das plantas, um dos processos metabólicos mais afetados pelas formas de N (BITTSÁNSZKY et al., 2015; CRUZ et al., 2014).

Dessa forma, verificou-se aumento da taxa de transpiração de plantas de *Solanum Lycopersicum* (BORGOGNONE et al., 2013) e diminuição da eficiência fotossintética de *Zea Mays* (VACULÍKOVÁ et al., 2014), causando menor crescimento das plantas.

Em concentrações elevadas de amônio, ocorre menor índice de cor verde das folhas de *Brassica napus* (HU et al., 2015) e de *Manihot esculenta* (CRUZ et al., 2014). Isso porque em ambas as espécies, foi observado aumento do conteúdo de espécies reativas de oxigênio, causando peroxidação oxidativa e diminuição dos teores de clorofila.

Em estudo com plantas de *Salvinia cucullata* sob concentrações de amônio, Jampeetong, Brix e Kantawanichkul (2012) observaram que concentrações acima de 5 mmol L⁻¹ de NH₄⁺ induziram o aparecimento de cloroses nas folhas mais velhas, associado a menores teores de clorofila, carotenoides e de K, diminuindo o crescimento da raiz e da parte aérea.

Em plantas de *Hydrilla verticillata* cultivadas em solução nutritiva com 3 mmol L⁻¹ de NH₄⁺, houve aumento no conteúdo de O₂⁻ e H₂O₂ nas folhas, induzindo o estresse oxidativo devido à peroxidação lipídica. No entanto, verificaram-se maiores atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD), peroxidase, catalase (CAT), glutathione redutase (GR) e ascorbato peroxidase (APX) (WANG et al., 2010), sugerindo que essa espécie apresenta um mecanismo de adaptação ao estresse por amônio, através de sistemas antioxidantes.

Estudou-se o efeito de altas concentrações de amônio em plantas de *Latuca sativa*, *Spinacia oleracea*, *Solanum lycopersicum* e *Pisum sativum*, com base no local e no nível da atividade enzimática (GDH e GS). Verificou-se maior atividade das enzimas GDH e GS nas folhas em relação às raízes em alface, espinafre e tomate, enquanto o contrário ocorreu nas plantas de ervilha, sendo consideradas tolerantes à toxicidade de amônio (CRUZ et al., 2006).

A área foliar, o diâmetro do caule e a altura de plantas também podem ser afetados pelo excesso de amônio. Os prejuízos causados pelo NH₄⁺ sobre essas variáveis foram observados em plantas de *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015); de *Eucalyptus urophylla* (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014) e de *Solanum lycopersicum* (BORGOGNONE et al., 2013).

O excesso de NH₄⁺ está diretamente envolvido com o desenvolvimento das raízes, que são mais afetadas pela exposição a esse íon em relação aos outros órgãos das plantas (LI et al., 2014), com severas modificações fisiológicas e morfológicas (ZANIN et al., 2015).

O NH_4^+ em excesso causa o encurtamento das raízes primárias devido à inibição do alongamento e divisão celular nas zonas meristemáticas (PETRICKA; WINTER; ANNU, 2012), e como efeito secundário, a supressão das raízes laterais (LI et al., 2010). Nessas condições, há o aumento do efluxo de NH_4^+ na zona meristemática, conferido pela ação da GDP-manose pirofosforilase (GMPase), hipersensível ao NH_4^+ , em contraste com maior influxo desse íon nas células das raízes maduras (LI et al., 2014). Esses efeitos nocivos do amônio podem ser responsáveis pela redução de cerca de 70% do desenvolvimento das raízes (Liu et al., 2013). Além disso, as formas de N também podem afetar a síntese de atividade de hormônios nas raízes, inibindo ou promovendo o alongamento das células (Li et al., 2014). Em complemento, a aplicação de NH_4^+ em excesso, promove a inibição da síntese e do transporte de auxina nas células jovens das raízes (LI et al., 2013).

O balanço nutricional também é afetado pelo excesso de N amoniacal em plantas (PRADO, 2008; MARSCHNER, 2012; MENDOZA-VILLARREAL et al., 2015). O NH_4^+ em excesso na solução nutritiva diminui os acúmulos dos cátions K, Ca e Mg na parte aérea e na raiz, com relatos em várias espécies de plantas, como *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015); *Fragaria* spp. (CHOI; LATIGUI; LEE, 2011) e *Eucalyptus urophylla* (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014).

O desequilíbrio entre esses íons ocorre devido aos distúrbios nutricionais nas plantas (Li et al., 2013), evidenciando o efeito antagônico de NH_4^+ em relação aos cátions, por serem íons que competem pelos mesmos sítios de absorção (MARSCHNER, 2012). Esse desbalanço iônico ocorre em razão do aumento do influxo de NH_4^+ e de efluxo de cátions na membrana plasmática, havendo extrusão destes íons para o vacúolo celular, podendo causar sintomas de deficiências nutricionais às plantas (MENDONZA-VILLAREAL et al., 2015).

Maiores proporções de NH_4^+ também reduziram o acúmulo de N total, tanto em culturas sensíveis como o *Cucumis sativus* (ROOSTA; SCHJOERRING, 2008), *Triticum aestivum* e *Solanum lycopersicum* (HORCHANI, HAJRI; ASCHI-SMITI, 2011) e *Arabidopsis thaliana* (SARASKETA et al., 2014), quanto em culturas tolerantes, como *Saccharum* spp. (ISHIKAWA et al., 2009; CAMPOS, 2013). Ressalta-se que as respostas para os mecanismos envolvidos na absorção e na assimilação das diferentes formas de N pelas plantas, com reflexo no acúmulo de N

nas diversas espécies, ainda necessitam ser mais elucidadas (LI et al., 2014; SIMONS et al., 2014).

Os efeitos causados pela exposição de plantas ao excesso de NH_4^+ no meio de cultivo, com reflexos na nutrição de plantas, são apresentados por um número limitado de estudos, como, por exemplo, em *Brassica napus* (ARKOUN et al., 2012) e em *Zea mays* (ZANIN et al., 2015).

O fornecimento de NH_4^+ em excesso pode diminuir a eficiência de utilização de N nas raízes e na parte aérea, possivelmente devido ao consumo de luxo do nutriente (XU et al., 2012).

Apesar do considerável número de pesquisas envolvendo a elucidação da toxicidade de NH_4^+ em plantas, há a necessidade de melhor entendimento das alterações nutricionais, enzimáticas e fisiológicas deste cátion, principalmente em espécies frutíferas como o maracujazeiro, na qual estudos dessa natureza ainda não foram realizados.

2.4 Fatores que podem aliviar o estresse por excesso de NH_4^+ em plantas

Para a obtenção de respostas benéficas quanto à aplicação de nitrogênio, devem-se levar em consideração as práticas de manejo apropriadas que possibilitem o melhor aproveitamento do N fornecido à planta, tanto na forma de NH_4^+ quanto na de NO_3^- . Nesse contexto, vários fatores bióticos e abióticos têm sido atribuídos como mitigadores do estresse por excesso de N em plantas, tais como balanço iônico, irradiação, pH, relação NH_4^+ e NO_3^- e uso de elementos benéficos, como o silício.

A redução da toxicidade de NH_4^+ pela presença de NO_3^- ocorre porque a absorção deste ânion está associada com a alcalinização da rizosfera e o estímulo da captação de cátions, amenizando alguns dos efeitos nocivos do NH_4^+ (BRITTO; KRONZUCKER, 2005).

Em trabalho de revisão, Hauck (2010) relatou que a tolerância a altos níveis de amônio depende da capacidade de o vegetal produzir quantidades suficientes de esqueletos de carbono para a assimilação do NH_4^+ .

Em estudo avaliando o fornecimento de NO_3^- em plantas de pepino cultivadas com 10 mmol L^{-1} de NH_4^+ , Roosta e Schjoerring (2008) relatam que as plantas

apresentaram sintomas de toxicidade quando cultivadas apenas com o amônio, enquanto a aplicação de nitrato mitigou estes sintomas, aumentando a atividade da glutamina sintetase, aliviando a toxicidade por NH_4^+ .

Outra estratégia importante nesse contexto é o uso de elementos benéficos, como o silício (Si). Apesar de o Si não ser considerado um nutriente de plantas (EPSTEIN, 2009), esse elemento pode aumentar a tolerância de plantas a estresses abióticos e atenuar efeitos causados por distúrbios nutricionais (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014), destacando-se o excesso de nitrogênio (BYBORDI, 2010; FENG et al., 2010).

Neste sentido, acredita-se que o Si pode beneficiar a taxa de acúmulo de carbono na planta, aumentando a taxa de acúmulo de nitrogênio, favorecendo assim, o desenvolvimento do vegetal, mesmo quando a planta está exposta à concentração excessiva de NH_4^+ no meio de cultivo. Além disso, esse elemento pode funcionar como protetor das células em condições de estresse por excesso de NH_4^+ , por acumular-se na parede celular dos vegetais.

2.5 Silício na mitigação de estresse em plantas

O silício é o segundo elemento em abundância na crosta terrestre, seguido do oxigênio (EPSTEIN, 2009). O Si, quando absorvido pelas plantas, acumula-se na parede celular e nos espaços intercelulares na forma de sílica amorfa (MA; YAMAJI, 2006). Na epiderme celular, esse elemento une-se à celulose, podendo estar presente nos estômatos, nos tricomas e nos elementos de vasos (EPSTEIN, 2009).

O contato silício-raiz ocorre por fluxo de massa, na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), e o mecanismo de absorção é ativo (MALAVOLTA, 2006). Sua absorção é maior em gramíneas em relação a dicotiledôneas (KORNDORFER, 2006; MITANI; MA, 2005). Com base na capacidade de absorver silício, as plantas podem ser consideradas acumuladoras, intermediárias ou não acumuladoras desse elemento (MITANI; MA, 2005), podendo apresentar grande diferença no teor de Si no tecido, que vai de 0,1 a 10,0% da matéria seca, sendo essa variação atribuída a diferenças na capacidade de absorção de Si pelas raízes (EPSTEIN, 2009).

Embora o Si não seja considerado um nutriente de plantas, este elemento pode exercer efeito benéfico no crescimento e no desenvolvimento de plantas (MA, 2004), sendo crescentes as evidências do papel do Si na mitigação de estresses bióticos e abióticos (ZHU; GONG, 2014; MARAFON; ENDRES, 2013; WU et al., 2013; ROMERO et al., 2011; EPSTEIN, 2009).

A importância do silício nas plantas ocorre pelo fato de esse elemento estar envolvido na rigidez das paredes celulares, possibilitando maior resistência e melhor arquitetura foliar ao vegetal, e por atuar na parte fisiológica, aumentando a atividade fotossintética e o crescimento das plantas (SAVANT et al., 1999). Os efeitos benéficos do silício estão relacionados com a tolerância de plantas a estresses, sejam estes bióticos, sejam abióticos (EPSTEIN, 2009), como, por exemplo, distúrbios nutricionais (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014), destacando-se o excesso de nitrogênio (BYBORDI, 2010; FENG et al., 2010).

O silício, após ser absorvido na forma de ácido monossilícico, é acumulado na região abaxial das folhas, tornando-as mais eretas e com maior capacidade de absorção de luz (FENG et al., 2010), com incrementos na área fotossintética foliar (KURDALI et al., 2013). Em complemento, o Si pode formar dupla camada silicatada sobre a epiderme da folha, controlando, dessa forma, a condutância estomática e a concentração interna de CO₂, podendo favorecer a eficiência fotossintética das plantas (KOCHANOVÁ et al., 2014).

Em condições de estresse, o silício pode aumentar a integridade física das células, resultados observados em várias espécies de plantas, como *Zea mays* (KOCHANOVÁ et al., 2014) e *Cucumis melo* (LI et al., 2012), sob diferentes estresses abióticos. Este fato ocorre porque o Si pode reduzir a peroxidação lipídica, ao contribuir para a diminuição de espécies reativas de oxigênio, com manutenção das estruturas de cloroplastos (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014) e diminuição da degradação da clorofila, mantendo a integridade das membranas (KOCHANOVÁ et al., 2014). Também é sugerido que o Si pode ligar-se a complexos monofenóis livres, formando Si-fenol, evitando o acúmulo de espécies reativas de oxigênio nas organelas das células (MAKSIMOVIC et al., 2007).

Em complemento, o benefício do Si na fisiologia das plantas também se deve à diminuição da condutância estomática e da transpiração, resultando em maior

eficiência fotossintética, com maior crescimento de *Zea mays* (VACULÍKOVÁ et al., 2014; KOCHANOVÁ et al., 2014); de *Glycine max* (HAMAYUN et al., 2010); de *Cicer arietinum* (KURDALI et al., 2013) e de *Cucumis melo* (LI et al., 2012).

O silício pode interagir positivamente com nutrientes, a exemplo do N e dos cátions, e aumentar a eficiência nutricional, com maiores respostas de crescimento das plantas (LIANG, 1999). O aumento da eficiência de uso do nitrogênio em função da interação entre N e Si foi verificado em plantas de *Cicer arietinum* (KURDALI et al., 2013) e de *Oriza sativa* (DETMANN et al., 2012).

A relação entre Si e cátions varia com as espécies de plantas e as condições de estresses (CHEN et al., 2011). Especificamente para o potássio, a influência do Si sobre a absorção deste elemento está relacionada ao fato de que o Si estimula a atividade da H⁺-ATPase nas membranas, enzima que está diretamente ligada à absorção de K pelas plantas (LIANG, 1999).

A relação entre o suprimento de Si e a absorção de Ca é reportada por Liang (1999) em estudos com *Hordeum vulgare*, em que o fornecimento de Si promoveu maiores acúmulos de Ca nas folhas, sendo, portanto, determinante para maior tolerância das plantas ao estresse salino. Neste mesmo estudo, para as plantas cultivadas em solução nutritiva com estresse por excesso de NaCl, na presença de silício, também foram observados aumentos nos teores foliares de K, Ca e Mg, resultando em maior produção de matéria seca da raiz e da parte aérea.

Em estudo sobre concentrações de nitrogênio nas formas nítrica e amoniacal e suas interações com o Si em plantas de *Brassica napus*, Bybordi (2010) verificou que a presença do elemento benéfico promoveu aumento na produção de matéria fresca e na área foliar das plantas cultivadas em solução nutritiva com excesso de amônio, concluindo que houve efeito benéfico do Si em condições de estresse.

Avaliando a absorção de Si em plantas de *Saccharum* spp. cultivadas sob concentrações de nitrato e amônio, Keeping et al. (2015) verificaram que houve maior acúmulo de Si nas plantas cultivadas com amônio, favorecendo a produção de matéria seca das folhas e do colmo.

Estudos sobre a interação entre silício e excesso de amônio e de nitrato em plantas de *Saccharum* spp. e de *Cucumis sativus*, mostraram que o uso do elemento benéfico, em ambas as variedades de cana-de-açúcar e de pepino aliviou a

toxicidade de amônio proporcionando maiores acúmulos de matéria seca de plantas (CAMPOS, 2013).

Entretanto, pesquisas envolvendo o cultivo de plantas em solução nutritiva com excesso de amônio e o fornecimento de silício com mitigador da toxicidade do NH_4^+ em espécies frutíferas, ainda são incipientes na literatura, havendo a necessidade de mais estudos nesta área.

2.6 Marcha de crescimento e de acúmulo de nutrientes em mudas de frutíferas

Em condições de equilíbrio nutricional, as plantas têm maior capacidade de absorção e de acúmulo de nutrientes, garantindo adequado crescimento ao longo do ciclo de cultivo. Para avaliar a dinâmica de crescimento das plantas, faz-se necessário o estudo sobre a marcha de crescimento e o acúmulo de nutrientes, em função do tempo de cultivo.

Estudar o crescimento de mudas de frutíferas, a partir de mensuração da matéria seca acumulada pela planta, é fundamental para o planejamento do manejo nutricional que possibilite o máximo potencial produtivo das plantas (FEY et al., 2009), permitindo identificar a quantidade de nutrientes necessária em cada época de cultivo e em qual órgão cada nutriente se encontra em maior quantidade. Dessa forma, a taxa de crescimento e a marcha de acúmulo de nutrientes são importantes ferramentas para o auxílio de programas de adubação e de manejo de fertilizantes, especialmente em cultivo de mudas (ROZANE et al., 2013).

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos em diferentes espécies de frutíferas, relatando a taxa de crescimento e a marcha de acúmulo de nutrientes na fase de mudas, tanto em cultivo em solo quanto em substrato inerte, utilizando-se de solução nutritiva. Também são estudadas as exigências nutricionais em função do intervalo de tempo, que indicam a quantidade acumulada do nutriente de acordo com a massa vegetal preexistente, dadas pela taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) e pela taxa de absorção relativa de nutrientes (TARN) (WELBANK, 1962).

Nesse sentido, ao avaliar a taxa de crescimento absoluto e relativo e a taxa de acúmulo relativo de nutrientes em mudas de *Passiflora edulis*, durante 52 dias de cultivo em vasos preenchidos com solo, Fey et al. (2009) relataram que houve lento

crescimento das mudas na fase inicial de desenvolvimento. Entretanto, verificou-se maior acúmulo de matéria seca e de macro e micronutrientes, a partir dos 38 dias após o transplântio, contribuindo para maiores valores de TALON nesse período.

Propondo avaliar a taxa de absorção relativa de macro e micronutrientes em mudas de *Psidium guajava* cultivadas em solução nutritiva, Prado et al. (2007) verificaram que as taxas de acumulação líquida de nutrientes pelas plantas apresentaram tendências semelhantes às taxas de crescimento relativo. Estes mesmos autores complementam que a maior taxa de absorção dos nutrientes pelas mudas ocorreu no período de 45 a 60 dias após o transplante. Os macronutrientes absorvidos pelas mudas de goiabeira foram acumulados, preferencialmente, nas folhas e no caule, enquanto os micronutrientes se acumularam em quantidades semelhantes nos diferentes órgãos, em função da idade das plantas.

Com o objetivo de determinar a marcha de absorção de nutrientes e o crescimento de mudas enxertadas de *Averrhoa carambola*, produzida em solução nutritiva, Freitas et al. (2011) afirmaram que o acúmulo de massa seca das mudas apresentou ajuste sigmoidal, enquanto o acúmulo de nutrientes apresentou incremento quadrático. O período de maior exigência de nutrientes foi entre 90 e 150 dias após o transplântio, obedecendo à seguinte sequência: $N > K > Ca > P > S > Mg > Fe > Mn > Zn > B > Cu$, sendo maior nas folhas para todos os nutrientes, à exceção do P, Zn, Fe e Cu, que foram mais acumulados nas raízes.

Em estudos sobre o crescimento e o acúmulo de nutrientes em porta-enxertos de *Averrhoa carambola* cultivada em solução nutritiva, Rozane et al. (2013) determinaram a ordem decrescente dos nutrientes acumulados na matéria seca, sendo, $N > K > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Zn > Cu$, com maior acúmulo de nutrientes nas folhas, seguido do caule e das raízes. O período de maior exigência de nutrientes pelas mudas foi compreendido entre 25 e 75 dias após o transplântio.

Entretanto, a quantidade e a proporcionalidade dos nutrientes absorvidos pelas plantas são funções de características intrínsecas do vegetal, como também dos fatores externos, como, por exemplo, o suprimento de nutrientes no meio de cultivo. Observa-se que a capacidade em retirar os nutrientes do meio de cultivo e as quantidades requeridas variam não só com a espécie, mas também com a cultivar.

O acúmulo e a distribuição dos nutrientes minerais na planta dependem de seu estágio de desenvolvimento (MARSCHNER, 2012). Por outro lado, variações nos fatores ambientais, como temperatura e umidade, e tipo de substrato influenciam tanto na disponibilidade dos nutrientes como na absorção destes pelas raízes e, consequentemente, no crescimento da planta.

Quanto às curvas de acúmulo de nutrientes em mudas de frutíferas, tem-se observado que o acúmulo de nutrientes pode apresentar mesma tendência da curva de acúmulo de massa seca, geralmente apresentando três fases distintas: na primeira fase, a absorção é lenta, seguida de intenso acúmulo até atingir o ponto máximo, a partir do qual ocorre estabilidade (PRADO et al., 2007; FREITAS et al., 2011; ROZANE et al., 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus de Jaboticabal, localizada na cidade de Jaboticabal, a uma altitude de 610 metros, com as coordenadas geográficas de 21° 15' 22" S e 48° 18' 58" W, no período de fevereiro a novembro de 2014. O estudo foi realizado com mudas de maracujazeiro-amarelo, Híbrido BRS Rubi-do-Cerrado, cultivadas em vasos com capacidade de 1,7 L (diâmetro superior: 12 cm; diâmetro inferior: 10 cm; altura: 20 cm), preenchidos com casca de pínus, fornecendo-se solução nutritiva, a partir de três experimentos, que serão descritos a seguir:

3.1 Experimento I: Concentrações de nitrogênio e proporções de amônio e nitrato na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro

3.1.1 Delineamento experimental

Utilizou-se do delineamento em blocos casualizados, com três repetições, arranjados em esquema fatorial 4 x 5, constituído por quatro concentrações de nitrogênio: 2,5; 5,0; 10,0 e 20,0 mmol L⁻¹, que correspondem a 25; 50; 100 e 200% da concentração de N na solução nutritiva proposta por Hoagland e Arnon (1950), e por cinco proporções de NH₄⁺/NO₃⁻: 0/100; 25/75; 50/50; 75/25 e 100/0, correspondendo às proporções de 0; 25; 50; 75 e 100% de amônio em relação ao nitrato. Cada unidade experimental constou de uma muda cultivada em vaso de polipropileno com volume de 1,7 L.

3.1.2 Condições de crescimento das mudas

Utilizou-se da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA, das concentrações de nitrogênio e das proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻ que foram avaliadas (Tabela 2). Para os respectivos tratamentos, prepararam-se as soluções estoques, que foram armazenadas em

recipientes com capacidade para 20 litros, de onde eram retidas as quantidades necessárias para as aplicações diárias. Todas as soluções nutritivas foram preparadas com o uso de água deionizada.

Tabela 2. Concentrações dos nutrientes da solução nutritiva em função das concentrações de N e proporções de NH_4^+ e NO_3^- .

Concentração de N	NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻	Proporções de NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻					KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	KCl
		0/100	25/75	50/50	75/25	100/0			
		----- mmol L ⁻¹ -----							
2,5 mmol L ⁻¹	NH ₄ ⁺	0	0,625	1,25	1,875	2,5	1	2	5
	NO ₃ ⁻	2,5	1,875	1,25	0,625	0			
5,0 mmol L ⁻¹	NH ₄ ⁺	0	1,25	2,5	3,75	5,0	1	2	5
	NO ₃ ⁻	5,0	3,75	2,5	1,25	0			
10 mmol L ⁻¹	NH ₄ ⁺	0	2,5	5,0	7,5	10	1	2	5
	NO ₃ ⁻	10	7,5	5,0	2,5	0			
20 mmol L ⁻¹	NH ₄ ⁺	0	5,0	10	15	20	1	2	5
	NO ₃ ⁻	20	15	10	5,0	0			

Micronutrientes utilizados (g L⁻¹): H_3BO_3 = 2,86; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ = 1,81; ZnCl_2 = 0,10; CuCl_2 = 0,04; $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ = 0,02 e Fe-EDDHMA = 40,0 (HOAGLAND e ARNON, 1950).

Para a composição das referidas proporções de NH_4^+ e NO_3^- , foram utilizadas as fontes cloreto de amônio (NH_4Cl) e nitrato de cálcio [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$], respectivamente. Foram realizados balanceamentos das concentrações de cálcio entre os tratamentos, utilizando-se da fonte $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Os demais nutrientes foram fornecidos nas fontes de KH_2PO_4 , KCl e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. A solução nutritiva foi mantida com valor de pH $6,0 \pm 0,1$.

Para a obtenção das plântulas, a semeadura foi realizada na profundidade de aproximadamente 1,0 cm, em tubetes de 53 cm³, preenchidos com vermiculita, diariamente foi umedecida.

Aos 20 dias após a semeadura, ou 10 dias após a emergência, quando as mudas apresentavam dois pares de folhas completamente formadas, foram transplantadas para os vasos, tendo como substrato casca de pínus esterilizada, apresentando granulometria de 6,0 mm, densidade de 275,9 kg m⁻³ e capacidade de retenção de água de 1,32 kg kg⁻¹ do substrato.

Obtiveram-se os dados de temperatura média do ar e umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com o auxílio de um termo-higrômetro digital (Instrutemp®), no período do transplante até a coleta das plantas,

correspondendo aos meses de março e abril de 2014, com duração de oito semanas (Figura 1).

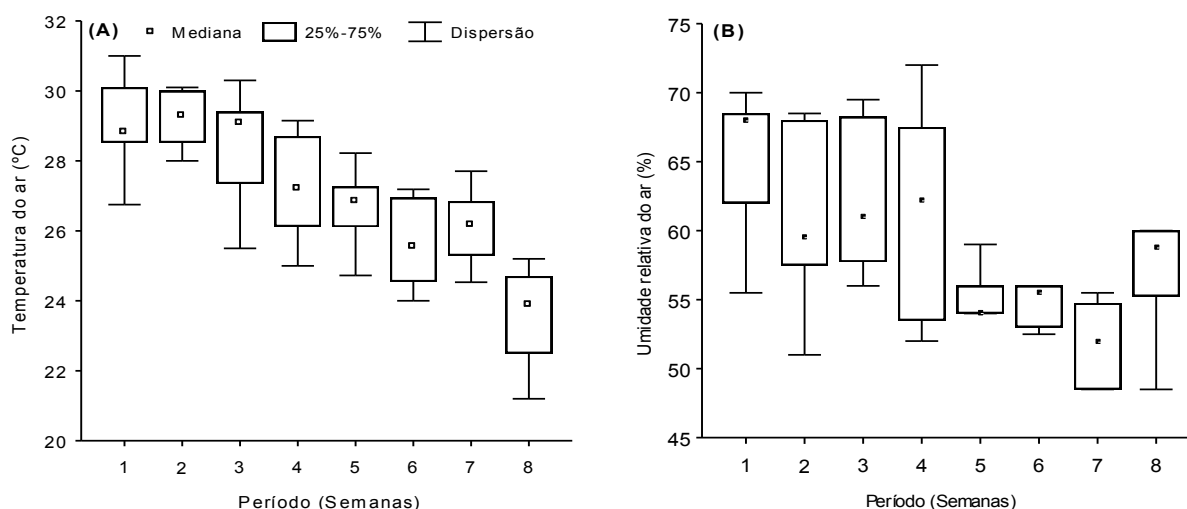


Figura 1. Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento I.

Para cada vaso, utilizou-se das soluções nutritivas, conforme os tratamentos (Tabela 1), aplicando-se diariamente 50 mL, até os 20 dias após o transplante (DAT), 100 mL de 21 até 35 DAT e 150 mL de 36 até 60 DAT, de acordo com o desenvolvimento das plantas, determinado por meio de testes preliminares. Na base do vaso, havia orifícios e um prato de polipropileno (150 mL), permitindo a drenagem e a retenção da solução nutritiva. Ao final do dia, a solução era retornada aos vasos, manualmente.

3.1.3 Variáveis analisadas

Quando as mudas apresentavam de 8 a 10 folhas vigorosas e com emissão da primeira gavinha (60 DAT), foram avaliados: o índice de cor verde, tomando-se a média das leituras no terço superior, mediano e inferior da quarta folha, completamente desenvolvida, a partir do ápice, sendo esta, considerada a folha diagnose de mudas de maracujazeiro (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Utilizou-se de clorofilômetro (Opti-Sciences®, CCM-200, Chlorophyll Meter); o diâmetro do caule (mm), mensurado a 2 cm da base do caule por meio de leituras com paquímetro digital (Starrett®727-2001); a área foliar (cm²), obtida de todas as

folhas das plantas a partir de um medidor digital portátil (Li-Cor, modelo L1-3000®); o comprimento radicular (cm), avaliando-se o comprimento da raiz principal, com o auxílio de trena milimetrada.

Eliminou-se o substrato do sistema radicular, por meio de água corrente. Em seguida, realizou-se a coleta da raiz e da parte aérea das plantas que foram submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 65°C, durante 96 horas, até atingirem pesos constantes. Em seguida, obtiveram-se as massas das matérias secas da raiz e da parte aérea das plantas.

O material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e, em seguida, determinaram-se os teores de N, K, Ca e Mg, seguindo a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983). Em função do teor desses nutrientes e da matéria seca, calculou-se o acúmulo de N, P, K, Ca nas raízes e na parte aérea (mg por planta), e a partir do acúmulo de N nas raízes e na parte aérea, calculou-se a eficiência de utilização de N nesses órgãos = $(\text{matéria seca do órgão})^2 / (\text{acúmulo de N no órgão})$ (FAGERIA; BALIGAR, 2005).

3.1.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F ($P \leq 0,05$). Em todas as variáveis, aplicou-se a análise de regressão polinomial, optando pelo modelo significativo de maior grau e com maior coeficiente de determinação, por meio do teste F ($P \leq 0,05$). Realizou-se a análise de correlação de Pearson ($P \leq 0,05$) entre as variáveis. Utilizou-se do software Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JR, 2009).

3.2 Experimento II: Silício e toxicidade de amônio na fisiologia, na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro

3.2.1 Delineamento experimental

Utilizou-se do delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições, arranjos em esquema fatorial 2 x 2, correspondendo a duas proporções de NH_4^+ e

NO_3^- (40/60%, sem excesso de amônio; e 75/25%, excesso de amônio), sendo que essas relações foram determinadas conforme ensaios preliminares realizados, na ausência e na presença de silício (2 mmol L^{-1}). Utilizou-se da concentração de 13 mmol L^{-1} de N. Cada unidade experimental constou de duas mudas cultivadas em vaso de polipropileno com volume de $1,7 \text{ L}$.

3.2.2 Condições de crescimento das mudas

Utilizou-se da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA e dos tratamentos com nitrogênio e silício (Tabela 3). Para a composição das referidas proporções de NH_4^+ e NO_3^- , foram utilizados o NH_4Cl (N = 26,4%) e o $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (N = 11,1%) como fontes de N amoniacal e nítrica, respectivamente, e o silício, na forma de ácido monossilícico (Si = $28,5 \text{ g L}^{-1}$). Os tratamentos foram balanceados para as concentrações de cálcio, na forma de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Os demais macronutrientes foram fornecidos nas fontes de KH_2PO_4 , KCl e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. A solução nutritiva foi mantida com valor pH $6,0 \pm 0,1$.

Tabela 3. Concentrações dos nutrientes da solução nutritiva em função das proporções de NH_4^+ e NO_3^- e da concentração de silício.

Proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$	Si	NH_4^+	NO_3^-	P	K	Ca	Mg	S
%	mmol L^{-1}							
40/60	0	5,2	7,8	1	6	7,8	2	2
	2	5,2	7,8					
75/25	0	9,8	3,2	1	6	7,8	2	2
	2	9,8	3,2					

Micronutrientes utilizados (g L^{-1}): H_3BO_3 = 2,86; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ = 1,81; ZnCl_2 = 0,10; CuCl_2 = 0,04; $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ = 0,02 e Fe-EDDHMA = 40,0 (HOAGLAND; ARNON, 1950).

Para a condução do experimento, para a obtenção das plântulas e para o manejo da solução nutritiva, seguiu-se a mesma metodologia descrita no experimento I.

Obtiveram-se os dados de temperatura média do ar e umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com o auxílio de um termo-higrômetro digital (Instrutemp®), no período do transplântio até a coleta das plantas,

correspondendo aos meses de agosto e setembro de 2014, com duração de oito semanas (Figura 2).

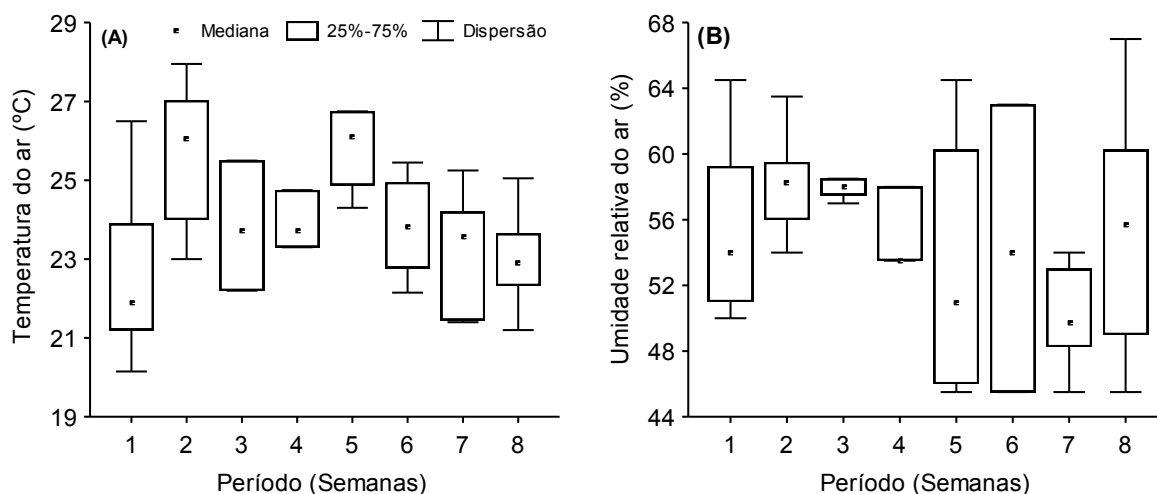


Figura 2. Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) na casa de vegetação, durante o desenvolvimento do experimento II.

3.2.3 Variáveis analisadas

Aos 60 DAT, quando as mudas apresentavam de 8 a 10 folhas verdadeiras vigorosas e com emissão da primeira gavinha, foram realizadas avaliações na quarta folha, completamente desenvolvida, a partir do ápice, em duas plantas por unidade experimental.

As variáveis avaliadas foram: concentração interna de CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e fotossíntese ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), por meio de um aparelho analisador de gases infravermelho (LICOR, Inc., LI-6400), sob concentrações de CO_2 ambiente ($372 \pm 10 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), com fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $1.200 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, entre as 7 e 8 h; índice de cor verde, tomando-se a média das leituras no terço superior, mediano e inferior das folhas, entre as 11 e 12 h, com auxílio de um clorofilômetro (Opti-Sciences®, CCM-200, Chlorophyll Meter); integridade física das membranas das células foliares, determinada pelo índice de vazamento de eletrólito, utilizando-se de condutivímetro: Coletaram-se discos de 200 mg da quarta folha da cada planta e transferiu-os para béqueres (25 mL) e adicionou-se 20 ml de água destilada, com temperatura de 25°C , permanecendo por 1 h. Mediu-se a condutividade elétrica inicial (CE_1). Em

seguida, as amostras foram emergidas em água destilada a 100°C, permanecendo por 2 h, período necessário para que a solução estivesse com temperatura de 25°C. Mediu-se a condutividade elétrica final (CE₂). O vazamento de eletrólitos (VE, %) foi calculado como: $VE = (CE_1/CE_2) \cdot 100$ (DIONISIO-SESE; TOBITA, 1998).

Em seguida, avaliou-se o diâmetro do caule (mm), mensurado a 2 cm da base do caule, empregando paquímetro digital (Starrett®727-2001); a área foliar (cm²), obtida pela somatória da área de todas as folhas, de cada planta, a partir de medidor digital (Li-Cor, modelo L1-3000®), e o comprimento da raiz principal (cm).

Realizou-se a coleta das raízes e da parte aérea das plantas, sendo lavadas e secas em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 65 ± 2°C, durante 96 horas. Em seguida, obtiveram-se as massas das matérias secas da raiz e da parte aérea das plantas.

O material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e, em seguida, determinaram-se os teores de N, K, Ca e Mg, seguindo a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983), e os teores de silício, de acordo com Kraska e Breitenbech (2010). Em função do teor desses elementos e da matéria seca, calculou-se o acúmulo de N, K, Ca Mg e de Si na raiz e na parte aérea. A partir do acúmulo de N nas raízes e na parte aérea, calculou-se a eficiência de utilização de N nesses órgãos = $(\text{massa da matéria seca do órgão})^2 / (\text{acúmulo de N no órgão})$ (FAGERIA; BALIGAR, 2005).

3.2.4 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, seguido da comparação de médias pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), utilizando-se do software Sisvar (FERREIRA, 2011).

3.3 Experimento III: Taxa de crescimento relativo e marcha de absorção de nutrientes e silício em mudas de maracujazeiro

3.3.1 Delineamento experimental

Utilizou-se de delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições e sete tratamentos, constituídos pelos tempos de cultivo das mudas: 0; 10; 20; 30; 40; 50 e 60 dias após o transplântio, quantificados em graus-dia (GD). A quantificação da exigência térmica diária das plantas, em graus-dia, utilizando-se da temperatura basal de 8°C para o crescimento inicial do maracujazeiro, está de acordo com Maciel et al. (1994), contabilizando-se as unidades térmicas diárias acumuladas em cada período de crescimento das mudas, conforme a seguinte equação:

$$GD = (T_m - T_b) + (T_M - T_m)/2 = \text{graus-dia}; (T_b < T_m).$$

Sendo:

GD = graus-dia;

TM = temperatura máxima diária;

Tm = temperatura mínima diária;

Tb = temperatura basal.

Dessa forma, os tratamentos referentes aos respectivos tempos de cultivo foram: 0; 175; 330; 585; 785; 980, e 1.175 graus-dia. Cada unidade experimental constou de uma muda cultivada em vaso de polipropileno com volume de 1,7 L.

3.3.2 Condições de crescimento das mudas

Utilizou-se da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), com modificação da fonte de ferro para Fe-EDDHMA e da concentração de nitrogênio, fornecendo-se 13 mmol L⁻¹ de N na proporção de 40% de NH₄⁺ e 60% de NO₃⁻, considerada como adequada para o crescimento de mudas de maracujazeiro, conforme ensaios preliminares realizados. Para a composição das referidas proporções de NH₄⁺ e NO₃⁻, foram utilizados o NH₄Cl (N = 26,4%) e o Ca(NO₃)₂.5H₂O (N = 11,1%) como

fontes de N amoniacal e nítrico, respectivamente. Também foi fornecido silício na forma de ácido monossilícico ($28,5 \text{ g L}^{-1}$ de Si) na concentração de 2 mmol L^{-1} de Si. Os demais nutrientes foram fornecidos nas fontes de KH_2PO_4 , KCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 , CuCl_2 , e $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. A solução nutritiva foi mantida com valor pH $6,0 \pm 0,1$.

Para a condução do experimento, para a obtenção das plântulas e para o manejo da solução nutritiva, seguiu-se a mesma metodologia descrita no experimento I.

Obtiveram-se os dados da temperatura média do ar e da umidade relativa do ar, coletados diariamente dentro da casa de vegetação, com auxílio de um termo-higrômetro digital (Instrutemp®), no período do transplântio até a última coleta das plantas, correspondendo aos meses de outubro e novembro de 2014 (Figura 3).

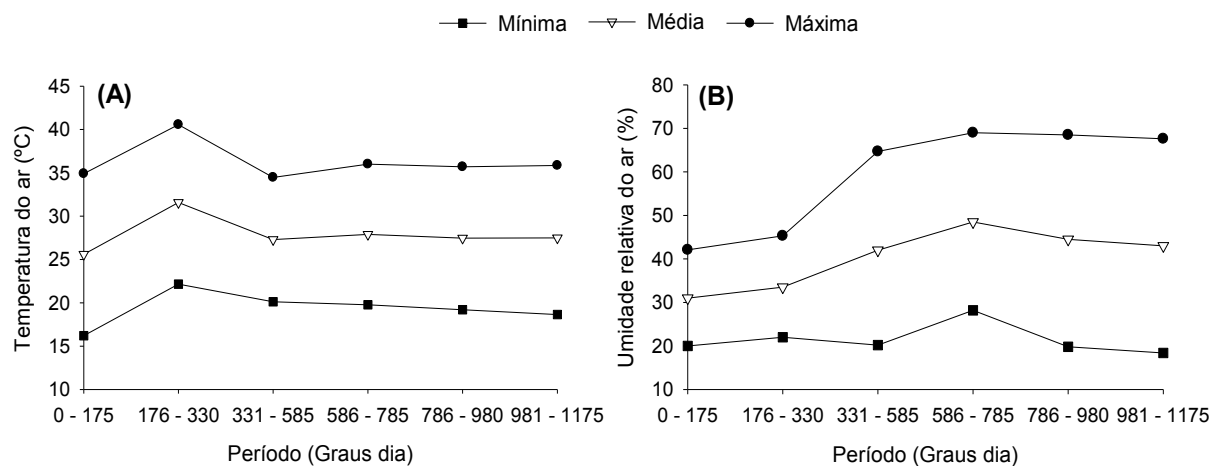


Figura 3. Valores de temperatura média do ar (A) e umidade relativa do ar (B) da casa de vegetação, em função do período de graus-dia acumulados durante o desenvolvimento do experimento III.

3.3.3 Variáveis analisadas

A primeira amostragem foi realizada no momento do transplântio das mudas para os vasos. A partir desta coleta, foram realizadas, a cada 10 dias, as demais amostragens de plantas até completar 1175 graus-dia ou 60 DAT, período considerado adequado para a formação das mudas de maracujazeiro-amarelo, segundo recomendações de São José (1994).

Em cada coleta (tempo de cultivo), foram avaliados: a altura de plantas, mensurada da base do caule até a inserção da folha mais jovem, utilizando-se de trena milimetrada; o diâmetro do caule (mm), mensurado a 2 cm da base do caule por meio de leituras em paquímetro digital (Starrett® 727-2001), e o comprimento da raiz principal (cm).

Separam-se a raiz, o caule e as folhas das plantas, sendo lavados e secos em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de $65 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 96 horas. Em seguida, obtiveram-se as massas das matérias secas da raiz, do caule e das folhas. A massa da matéria seca da planta inteira foi calculada pelo somatório das massas dos respectivos órgãos.

O material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e, em seguida, determinaram-se os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe e Cu, seguindo a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983) e os teores de Si, de acordo com Kraska e Breitenbech (2010). Em função do teor desses elementos e da matéria seca, calculou-se o acúmulo de macronutrientes e de micronutrientes e Si na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira, em cada período de crescimento.

Foram calculados os índices nutricionais, estimados pelas fórmulas proposta por Welbank (1962):

Taxa de Acumulação Relativa do Nutriente (TARN):

$$\text{TARN} = \frac{(N_2 - N_1)(\ln m_2 - \ln m_1)}{(GD_2 - GD_1)(m_2 - m_1)} = \text{mg por g por graus-dia}$$

Taxa de Acumulação Líquida Organogênica do Nutriente (TALON):

$$\text{TALON} = \frac{(N_2 - N_1)(\ln M_2 - \ln M_1)}{(GD_2 - GD_1)(M_2 - M_1)} = \text{mg por g por graus-dia}$$

Taxa de Crescimento Relativo (TCR):

$$\text{TCR} = \frac{(\ln m_2 - \ln m_1)}{(m_2 - m_1)} = \text{mg por g por graus-dia}$$

Sendo:

GD = Graus-dia referentes a cada período de crescimento das mudas;

N1 e N2 = quantidade do nutriente no órgão vegetal referente aos períodos GD1 e GD2, respectivamente;

M1 e M2 = massa da planta inteira referente aos períodos GD1 e GD2, respectivamente;

m1 e m2 = massa de cada órgão da planta referente aos períodos GD1 e GD2, respectivamente;

ln = logaritmo neperiano.

3.3.4 Análise estatística

Em todas as variáveis, aplicou-se a análise de regressão polinomial, optando pelo modelo significativo e com maior coeficiente de determinação, por meio do teste F ($P \leq 0,05$). Realizou-se a análise de correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre as variáveis. Utilizou-se do software Sisvar (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento I: Concentrações de nitrogênio e proporções de amônio e nitrato na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro

4.1.1 Índice de cor verde e acúmulo de N, K, Ca e Mg

Houve interação entre as concentrações de N e proporções de NH_4^+ sobre o índice de cor verde das folhas, acúmulo de K e Ca nas raízes e na parte aérea, e acúmulo de Mg nas raízes. Não houve interação destes fatores no acúmulo de N nas raízes e na parte aérea, e o acúmulo de Mg na parte aérea. Verifica-se efeito individual das concentrações de nitrogênio sobre o acúmulo de N e de Mg na matéria seca da parte aérea, assim como das proporções de NH_4^+ sobre o acúmulo de N nas raízes e na parte aérea, e de Mg na parte aérea (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância e resultados médios do índice de cor verde das folhas (ICV) e do acúmulo de N, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.

Concentrações de N (C)	ICV	N		K		Ca		Mg	
		Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
----- mg por planta -----									
2,5 mmol L ⁻¹	31,0	19,4	83,5	38,6	75,9	4,2	47,3	4,3	10,2
5 mmol L ⁻¹	36,6	20,0	111,2	37,6	105,4	4,3	56,2	4,5	11,9
10 mmol L ⁻¹	47,0	20,3	119,1	36,0	96,8	4,2	45,9	4,4	11,4
20 mmol L ⁻¹	52,0	17,5	120,6	25,3	86,1	3,4	43,4	3,0	10,5

Proporções de NH_4^+ (P)									
0 %	45,4	19,7	114,3	31,9	96,3	4,4	57,2	4,1	12,2
25 %	47,5	20,1	123,8	37,5	97,7	4,6	61,0	4,0	13,5
50 %	45,4	22,3	120,3	45,1	89,1	4,8	49,0	4,8	12,1
75 %	45,2	20,6	109,3	35,8	87,1	3,8	43,5	4,2	10,1
100 %	25,0	13,7	75,3	21,6	85,2	2,5	30,3	2,9	7,0

		Teste F							
C	32,0**	1,1 ^{ns}	11,7**	21,5**	15,4**	9,0**	8,6**	17,2**	3,0**
P	24,7**	6,4**	11,9**	34,1**	2,4 ^{ns}	36,1**	32,8**	13,7**	23,3**
C x P	4,4**	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	4,1**	5,1**	6,4*	2,6*	5,9**	2,0 ^{ns}
C.V. (%)	15,7	23,2	17,9	14,9	13,9	13,1	15,2	6,1	16,6

C.V. = coeficiente de variação; *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Os valores máximos para o índice de cor verde ocorreram com as proporções de NH_4^+ de 31,3; 37,8 e 37,2%, atingindo índices de 42,5; 58,6 e 66,5, associados com as concentrações de 5; 10 e 20 mmol L^{-1} de N, respectivamente, não havendo ajuste de regressão quando usada a menor concentração de N (Figura 4A).

Ressalta-se que, na máxima proporção de NH_4^+ , houve diminuição dos valores do índice de cor verde, indicando os danos causados pelo excesso deste cátion no maracujazeiro. O excesso de amônio causa alterações de várias reações metabólicas, induzindo aumento no conteúdo de espécies reativas de oxigênio, O_2 e H_2O_2 , que podem causar peroxidação oxidativa, diminuindo os teores de clorofilas *a* e *b* (JAMPEETONG; BRIK; KANTAWANICHKUL, 2012), e menor atividade fotossintética (BORGOGNONE et al., 2013; HUANG et al., 2013). Como resultado dessas reações, as folhas apresentam sintomas de clorose e necrose, com menor índice de cor verde (LI et al., 2014; PRADO, 2008).

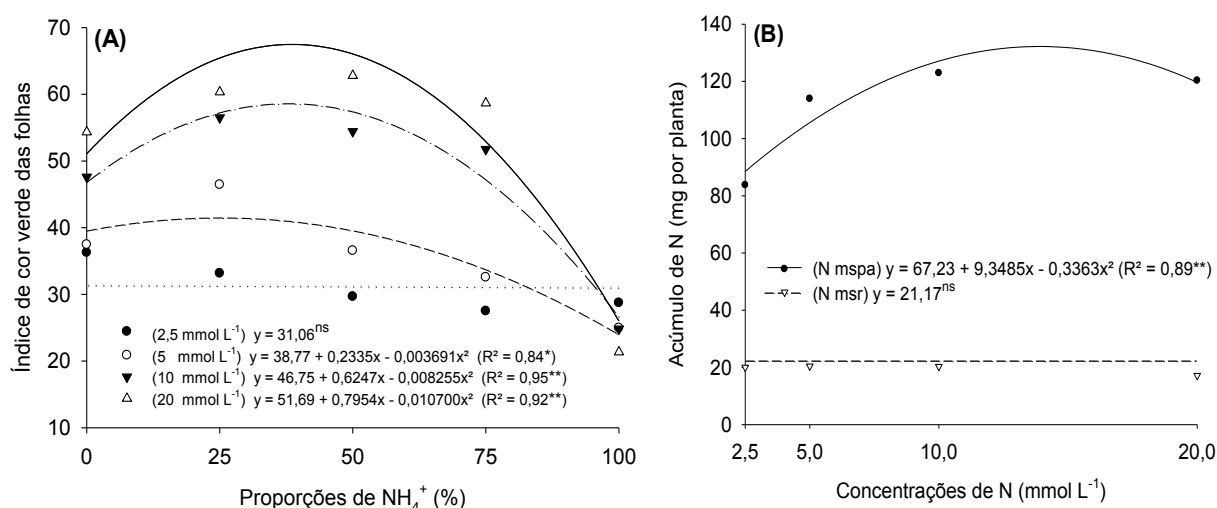


Figura 4. Índice de cor verde das folhas em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva (A), e acúmulo de N total na raiz e na parte aérea das mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N (B) (média das proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^-). *, ** e $^{\text{ns}}$ = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

O aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva incrementou o acúmulo de N apenas na parte aérea, atingindo o valor máximo na concentração de N igual a 13,8 mmol L^{-1} (Figura 4B). O acúmulo máximo de N na raiz e na parte

aérea ocorreu com o uso da proporção de NH_4^+ igual a 40,7 e 33,9%, respectivamente (Tabela 5).

Nota-se que o equilíbrio da proporção de amônio e nitrato, entre 34 e 66% e 41 e 59%, favorece a absorção do nitrogênio pelo maracujazeiro, independentemente da concentração do macronutriente na solução nutritiva (Tabela 5).

Tabela 5. Acúmulo de N, K, Ca e Mg na raiz e na parte aérea (mg por planta) de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.

de NH ₄ ⁺ em relação ao NO ₃ ⁻ na solução nutritiva.							
Nutriente	Órgão	N (mmol L ⁻¹)	Equações	R ²	Xmax	Ymax	
N	Raiz	Efeito isolado	y = 18,7 + 0,2206x - 0,002701x ²	0,99**	40,7	23,3	
	Parte aérea	Efeito isolado	y = 114,8 + 0,8402x - 0,012400x ²	0,86**	33,9	129,0	
K	Raiz	2,5	y = 28,7 + 0,8197x - 0,008800x ²	0,91**	46,6	47,8	
		5	y = 36,6 + 0,2638x - 0,003245x ²	0,76*	40,6	41,9	
		10	y = 37,8 + 0,3740x - 0,005457x ²	0,94**	34,2	50,4	
		20	y = 20,7 + 0,5521x - 0,006135x ²	0,78**	45,0	33,1	
	Parte aérea	2,5	y = 75,9 ^{ns}	—	—	—	
		5	y = 112,8 + 0,5364x - 0,009128x ²	0,91**	29,4	120,7	
		10	y = 96,8 ^{ns}	—	—	—	
		20	y = 84,7 ^{ns}	—	—	—	
	Ca	Raiz	2,5	y = 3,3 ^{ns}	—	—	—
			5	y = 5,5 - 0,0243x	0,94**	0,0	5,5
10			y = 4,9 + 0,0187x - 0,000446x ²	0,96**	21,0	5,2	
20			y = 4,0 + 0,0257x - 0,000489x ²	0,97**	26,3	4,3	
Parte aérea		2,5	y = 62,9 - 0,3127x	0,66**	0,0	62,9	
		5	y = 73,7 - 0,3506x	0,95**	0,0	73,7	
		10	y = 49,3 + 0,3816x - 0,005984x ²	0,71**	31,8	55,4	
		20	y = 56,4 - 0,2586x	0,87**	0,0	56,4	
Mg	Raiz	2,5	y = 3,3 ^{ns}	—	—	—	
		5	y = 4,42 ^{ns}	—	—	—	
		10	y = 5,67 - 0,0255x	0,98**	0,0	5,7	
		20	y = 2,99 ^{ns}	—	—	—	
	Parte aérea	Efeito isolado	y = 12,44 + 0,0509x - 0,001064x ²	0,98**	27,9	13,0	

R^2 = coeficiente de determinação; Xmax (% de NH_4^+); Ymax (acúmulo do nutriente, mg por planta); *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

O equilíbrio das formas de N na solução nutritiva, no maior acúmulo desse nutriente na planta, é amplamente conhecido na literatura (ZANIN et al., 2015;

KONISHI et al., 2014). Esse efeito ocorreu, provavelmente, pelo fato de que o aumento da concentração do amônio nessa proporção, no citoplasma das células, não causou toxicidade às plantas de maracujazeiro, pois as mesmas podem adotar diferentes estratégias, incluindo a regulação do transportador de amônio (LANQUAR et al., 2009) e o aumento da assimilação desse íon (SETIEN et al., 2014).

No entanto, maiores proporções de NH_4^+ diminuíram o acúmulo de N total na planta, fato relatado por outros autores, tanto em culturas consideradas sensíveis, como *Triticum aestivum* e *Solanum lycopersicum* (HORCHANI; HAJRI; ASCHISMITI, 2011); *Arabidopsis thaliana* (SARASKETA et al., 2014), e *Cucumis sativus* (ROOSTA et al., 2009; CAMPOS, 2013), quanto em culturas consideradas tolerantes, como *Saccharum* spp. (ISHIKAWA et al., 2009; CAMPOS, 2013). Ressalta-se que ainda necessitam ser mais elucidadas as respostas para os mecanismos envolvidos na absorção das diferentes formas de N pelas plantas e o reflexo no acúmulo deste nutriente nas diversas espécies (LI et al., 2014; SIMONS et al., 2014).

O aumento da proporção de amônio na solução nutritiva, de 34,2 a 46,6%, dependendo da concentração de N, diminuiu o acúmulo de K na raiz (Tabela 5). No entanto, na parte aérea, esse efeito foi evidente apenas na concentração de 5 mmol L^{-1} de N, havendo diminuição no acúmulo de K neste órgão com uso da proporção de NH_4^+ acima de 29,4%. Houve decréscimo no acúmulo de Ca na planta com o aumento da proporção de amônio na solução nutritiva acima de 0 ou 26,3% na raiz e 0 ou 31,8% na parte aérea, dependendo da concentração de N utilizada, enquanto que o decréscimo linear do acúmulo de Mg na raiz ocorreu apenas com o uso de 10 mmol L^{-1} de N quando foi utilizada qualquer proporção de NH_4^+ . Por outro lado, houve aumento do acúmulo de Mg na parte aérea com proporção de amônio acima de 27,9%, independentemente da concentração de N.

De modo geral, a diminuição nos acúmulos de K, Ca e Mg sob elevadas concentrações de NH_4^+ na solução nutritiva também foi relatada em outras culturas, como *Cucumis sativus* (1,0 mmol L^{-1}) (ROOSTA et al., 2009); *Eustoma grandiflorum* (7,5 mmol L^{-1}) (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015); *Eucalyptus urophylla* (3,9 mmol L^{-1}) (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014), e *Pisum sativum* (2,5 mmol L^{-1}) (ARIZ et al., 2011). Esse efeito ocorreu devido aos desequilíbrios nutricionais nas plantas (LI;

WANG; STEWART, 2013), evidenciando o efeito antagônico de NH_4^+ em relação à absorção desses cátions, por serem íons que competem pelos mesmos sítios de absorção (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015; MARSCHNER, 2012). Esse desbalanço iônico ocorre devido a alterações na taxa de influxo e efluxo de cátions na membrana plasmática, com o transporte destes íons para o vacúolo celular, seguido de secreção para os vasos do xilema (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015).

Acrescenta-se ainda que o menor acúmulo de cálcio nas plantas, em função do aumento da concentração de amônio na solução nutritiva, provavelmente, está relacionado ao fato de que a absorção de Ca ocorre unicamente nas raízes jovens, especificamente nas zonas meristemáticas, onde as células da endoderme ainda não estão suberizadas (MARSCHNER, 2012; PRADO, 2008), e o excesso de NH_4^+ causa injúrias a essas estruturas radiculares, diminuindo seu desenvolvimento (BRITTO; KRONZUCKER, 2002; LIU et al., 2013).

4.1.2 Crescimento, eficiência de uso do N e massa da matéria seca

As proporções de amônio afetaram o diâmetro do caule, a área foliar, o comprimento de raiz, a eficiência de utilização do nitrogênio e a matéria seca da raiz e da parte aérea das mudas, independentemente da concentração de N utilizada (Tabela 6). Entretanto, não houve efeito da interação entre os fatores estudados para essas variáveis.

O diâmetro de caule e a área foliar apresentaram maiores valores com o uso das concentrações de N iguais a 10,6 e 10,9 mmol L⁻¹, respectivamente (Figuras 5A e 5C). Proporções de amônio iguais a 44,1 e 42,4% promoveram maiores valores para o diâmetro do caule (Figura 5B) e a área foliar (Figura 5D), respectivamente. Resultados semelhantes do efeito do N na forma de amônio, no aumento do diâmetro do caule e da área foliar, também foram observados em mudas de outras espécies, como *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015) e *Ilex paraguariensis* (GAIAD; RAKOCEVIC; REISSMANN, 2006), cultivadas em solução nutritiva.

Tabela 6. Resumo da análise de variância e resultados médios do diâmetro do caule, da área foliar, do comprimento da raiz, da eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) e da matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N e proporções de NH_4^+ em relação ao NO_3^- na solução nutritiva.

Concentrações de N (C)	Diâmetro do caule	Área foliar	Comprimento da raiz	EUN		Matéria seca	
				Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
	mm	cm ²	cm	----- g ² g ⁻¹ -----		--- g por planta ---	
2,5 mmol L ⁻¹	3,4	423,4	30,5	40,3	67,3	0,9	2,4
5 mmol L ⁻¹	3,6	507,2	28,9	33,1	83,2	0,8	3,1
10 mmol L ⁻¹	3,4	497,8	30,7	29,1	82,4	0,7	3,1
20 mmol L ⁻¹	3,2	422,8	30,4	23,2	67,7	0,6	2,8
Proporções de NH_4^+ (P)							
0 %	3,7	447,2	29,1	29,5	79,5	0,7	3,0
25 %	3,5	491,6	31,4	33,2	85,9	0,8	3,2
50 %	3,5	492,2	32,2	42,4	81,0	0,9	3,1
75 %	3,3	477,7	30,7	31,3	78,4	0,8	3,1
100 %	3,0	405,2	27,1	20,8	51,0	0,5	1,9
----- Teste F -----							
C	3,4*	10,2**	0,8 ^{ns}	12,8**	4,7**	9,2**	6,5**
P	6,8**	5,2**	4,0**	12,0**	9,1**	16,4**	12,0**
C x P	0,8 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}	3,2 ^{ns}	0,9 ^{ns}
C.V. (%)	10,2	12,1	11,8	24,7	21,0	16,4	18,1

C.V. = coeficiente de variação; * significativo ao nível de $P \leq 0,05$, pelo teste F; ** significativo ao nível de $P \leq 0,01$, pelo teste F, ^{ns} não significativo.

A proporção de amônio de 45,3% em relação ao nitrato promoveu maior comprimento da raiz (Figura 5E), justificando a importância de se utilizar o uso combinado dessas formas de N nas plantas, conforme relatam Li et al. (2014) e LIU et al. (2013). No entanto, o excesso de amônio diminuiu o comprimento da raiz, fato este também apontado por outros autores (LIU et al., 2013). Isso, possivelmente, deve-se ao menor crescimento das raízes primárias devido à inibição do alongamento e da divisão celular nas zonas meristemáticas e à diminuição da emissão de raízes laterais (PETRICKA; WINTER; ANNU, 2012). Nessas condições, há o aumento do efluxo de NH_4^+ na zona meristemática, conferido pela ação da GDP-manose pirofosforilase (GMPase), que apresenta alta sensibilidade ao NH_4^+ , em contraste com maior influxo desse íon nas células das raízes maduras (LI et al., 2014). Além disso, estes mesmos autores relatam que o amônio também pode inibir a síntese de auxinas nas raízes, diminuindo o alongamento das células.

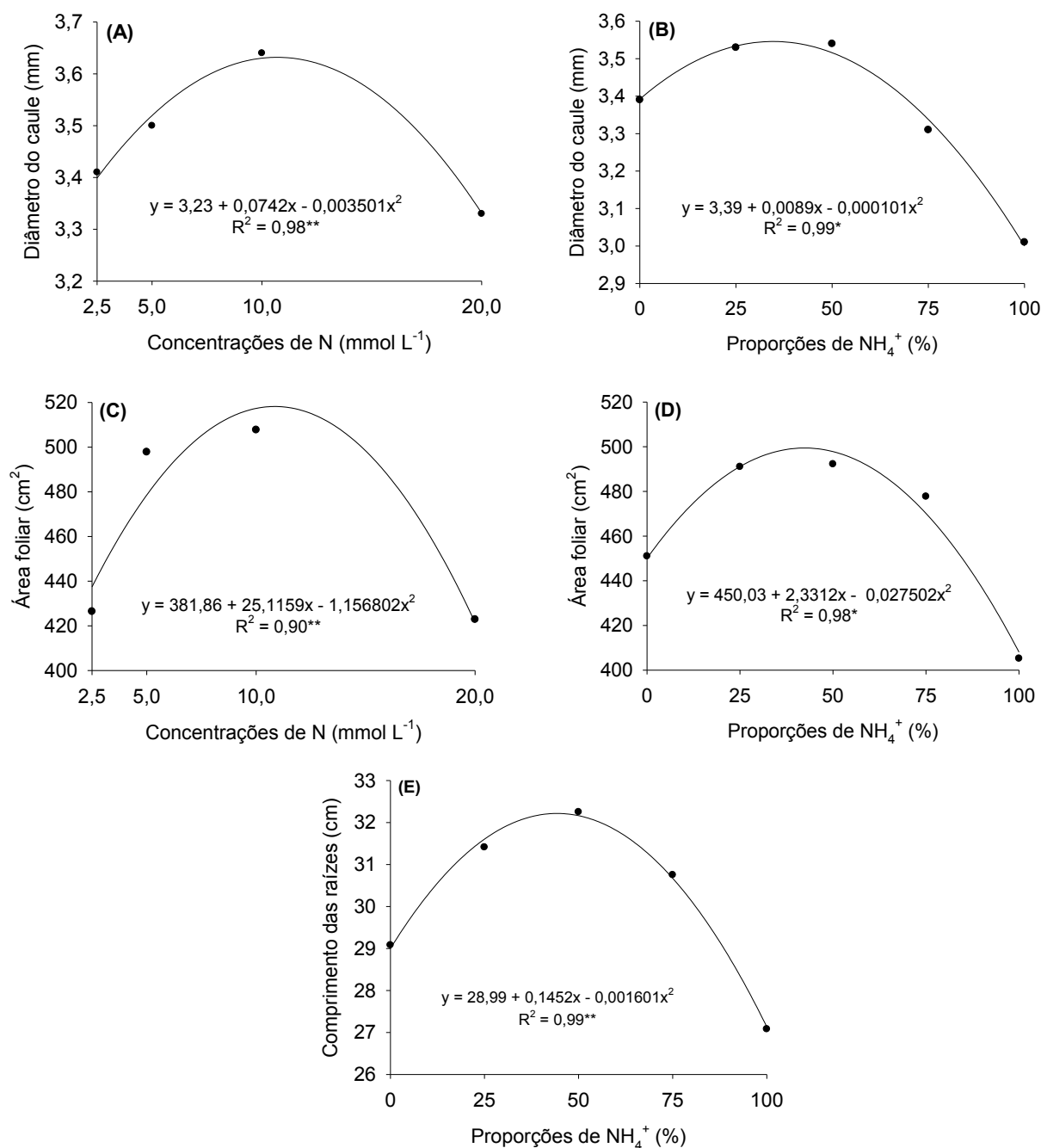


Figura 5. Diâmetro do caule, em função de concentrações de N (A) e proporções de NH₄⁺ (B), área foliar, em função de concentrações de N (C) e proporções de NH₄⁺ (D) e comprimento das raízes de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH₄⁺ em relação ao NO₃⁻ na solução nutritiva. * e ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F.

O incremento das concentrações de N na solução nutritiva diminuiu linearmente a eficiência de utilização do nutriente na raiz (EUNraiz) e aumentou na parte aérea (EUNpa), atingindo o máximo na concentração de N igual a 11,5 mmol L⁻¹.

¹ (Figura 6A). No entanto, o acréscimo das proporções de amônio na solução nutritiva aumentou a eficiência de utilização do macronutriente na raiz e na parte aérea, atingindo o máximo na proporção de NH_4^+ de 43,4 e 32,6%, respectivamente (Figura 6B).

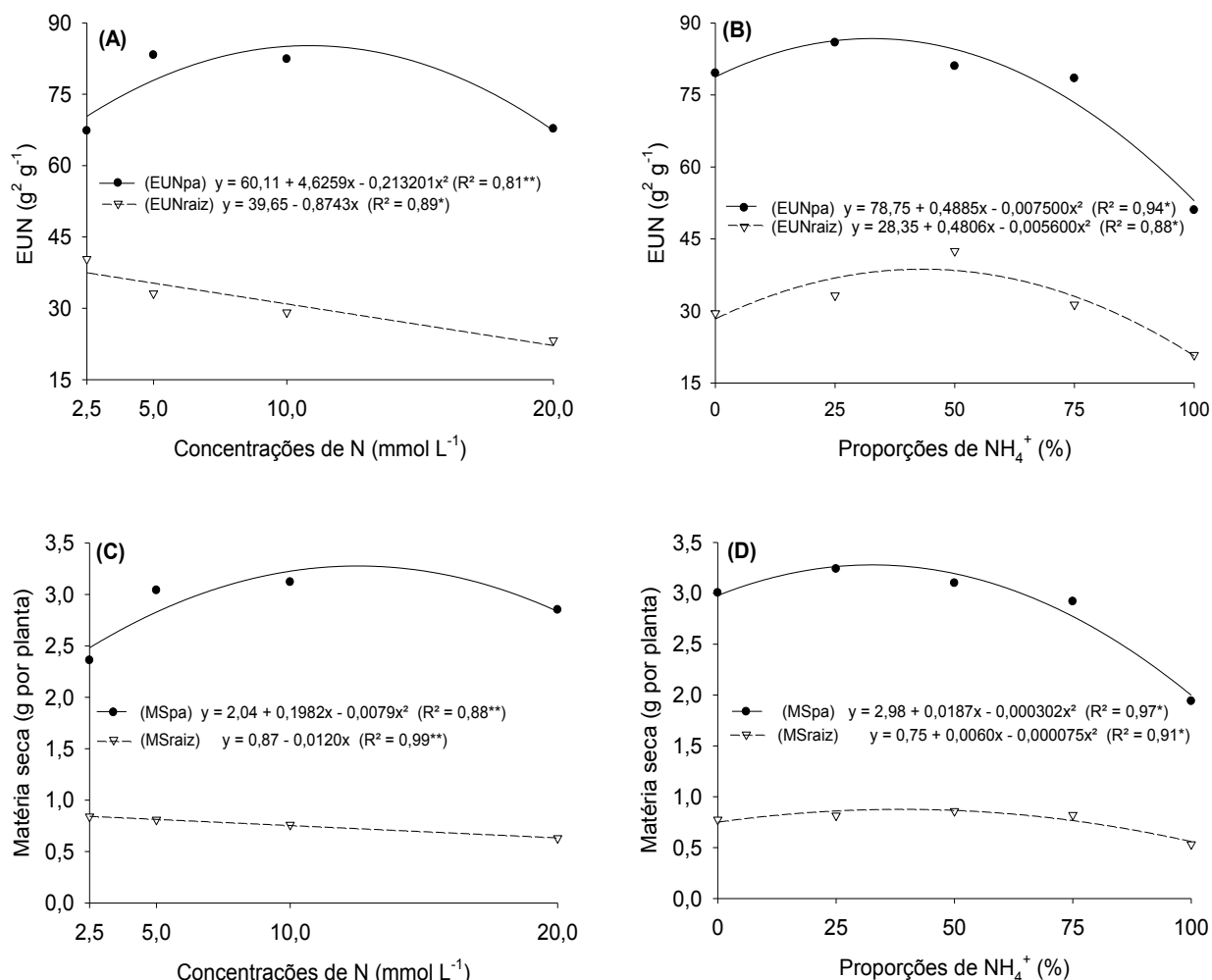


Figura 6. Eficiência de utilização de nitrogênio na raiz e na parte aérea, em função de concentrações de N (A) e de proporções de NH_4^+ (B) e matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de concentrações de N (C) e de proporções de NH_4^+ (D) na solução nutritiva. *, ** e ns = significativo ao nível de $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Nota-se que concentrações de N na solução nutritiva acima de 2,5 e de 11,5 mmol L⁻¹ diminuem a eficiência de utilização na raiz e na parte aérea, respectivamente (Figura 6A), possivelmente, devido ao consumo de luxo do nutriente, fato relatado na literatura (XU; FAN; MILLER, 2012).

As proporções de amônio até 32,6 e 43,4% favoreceram maior eficiência de utilização do N pelo maracujazeiro, possivelmente pelo menor gasto de energia da planta pela absorção do NH_4^+ para a assimilação do macronutriente pelas plantas (SETIEN et al., 2014). Soma-se a isto o fato de que, em proporções moderadas de amônio na solução nutritiva (34,2 a 46,6% de NH_4^+), favoreceu-se o aumento do acúmulo de K na raiz (Tabela 5), havendo correlação entre a eficiência de utilização de N e o acúmulo de K na raiz ($r = 0,82^{**}$). Diante do maior acúmulo de K na raiz das plantas, há um aumento da atividade de enzimas (GS, GOGAT e PEP carboxilase), que são chaves para a incorporação do amônio em cadeias carbônicas, refletindo na maior eficiência de uso do N pela planta (BITTSÁNSZKY et al., 2015).

A concentração de $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ de N resultou em maior matéria seca da raiz (MSraiz), 0,6 mg por planta, verificando-se decréscimo dessa variável com o aumento da concentração de N (Figura 6C). Isto indica que concentração de N relativamente baixa na solução nutritiva atende à exigência para o adequado crescimento da raiz da planta de maracujá. No entanto, na parte aérea (MSpa), a concentração de N adequada foi maior, ou seja, $12,6 \text{ mmol L}^{-1}$, com a matéria seca atingindo o máximo de 3,3 mg por planta (Figura 6C).

As proporções de 40 e 31% de NH_4^+ na solução nutritiva aumentaram a matéria seca da raiz e da parte aérea, respectivamente, atingindo valores máximos de 0,9 e 3,2 mg por planta (Figura 6D).

Este efeito dos tratamentos no aumento da produção de matéria seca das plantas é explicado pelas variáveis de crescimento, pois observou-se que houve correlação da matéria seca da planta inteira com o diâmetro do caule ($r = 0,65^{**}$) e com a área foliar ($0,79^{**}$).

Portanto, os incrementos na produção de matéria seca da raiz e da parte aérea das plantas, com o uso do N em proporção adequada de amônio e nitrato (Figuras 6C e 6D), ocorreram devido à otimização da eficiência de uso do N na raiz e na parte aérea da planta (Figuras 6A e 6B), pois houve correlação da EUNraiz com a matéria seca da raiz ($r = 0,85^{**}$) e da EUNpa com a matéria seca da parte aérea ($r = 0,94^{**}$).

Ressalta-se que, em concentrações de NH_4^+ acima dos valores adequados, houve diminuição da matéria seca das mudas devido aos efeitos deste cátion na

nutrição de plantas, sendo, portanto, efeitos diretos da ação nociva dessa forma de N nas plantas, conforme comentado anteriormente.

Pode-se fazer ainda, uma inferência de o maracujazeiro ser tolerante à concentrações elevadas de NH_4^+ na solução nutritiva, sendo que a proporção de 40% de NH_4^+ em 13 mmol L^{-1} de N, correspondendo a $5,7 \text{ mmol L}^{-1}$ de NH_4^+ , foi indicada no presente trabalho como concentração crítica de NH_4^+ , ou seja, que diminui em 10% a produção de matéria seca. Essa concentração crítica de NH_4^+ é superior àquelas apresentadas em trabalhos realizados em outras culturas, consideradas, segundo os autores, tolerantes ao N amoniacal, como *Pisum sativum*, com $2,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de NH_4^+ (CRUZ et al., 2011); *Eucaliptus grandis*, com $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de NH_4^+ (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014); *Lemna minor*, com $3,3 \text{ mmol L}^{-1}$ de NH_4^+ (HUANG et al., 2013), e *Solanum tuberosum*, com $4,1 \text{ mmol L}^{-1}$ de NH_4^+ (ZEBARTH et al., 2012). Já em espécies frutíferas, como *Fragaria* spp. (CHOI; LATIGUI; LEE, 2011) e *Citrus reticulata* (DOU; ALVA; BONDADA, 1999), houve menor crescimento das plantas com o uso de qualquer concentração de NH_4^+ .

4.2 Experimento II: Silício e toxicidade de amônio na fisiologia, na nutrição e no crescimento de mudas de maracujazeiro

4.2.1 Acúmulo de N, Si, K, Ca e Mg

Houve interação entre as proporções de NH_4^+ e NO_3^- e silício na solução nutritiva para o acúmulo de N e de Si na raiz. Verificou-se efeito individual das proporções de NH_4^+ e NO_3^- sobre o acúmulo de N na parte aérea, e de K, de Ca e de Mg na raiz e na parte aérea. O silício influenciou o acúmulo de N, de Si, de K, de Ca e de Mg na parte aérea de mudas de maracujazeiro (Tabela 7).

Os acúmulos de N e de Si na raiz de mudas de maracujazeiro diminuíram no tratamento com excesso de NH_4^+ em relação ao NO_3^- (Tabela 7). Entretanto, a presença de silício incrementou os acúmulos desses elementos na raiz, independentemente da proporção de amônio e de nitrato estudada (Figura 7A e 7B).

Tabela 7. Resumo da análise de variância e resultados médios do acúmulo de N, Si, K, Ca e Mg na matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva.

Proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (P)	N		Si		K		Ca		Mg	
	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
	----- mg por planta -----									
40/60	37,4	270,9	1,1	0,8	35,5	201,9	10,7	168,3	4,4	30,7
75/25	29,2	215,9	0,6	0,7	25,8	173,3	6,6	114,8	3,5	23,0
DMS	2,7	24,1	0,2	-	4,2	20,1	1,6	7,9	0,4	4,3
Silício (Si)										
Ausência	31,2	217,7	0,8	0,5	29,2	164,6	8,1	116,3	3,8	22,4
Presença	35,3	269,1	1,0	0,9	32,1	210,5	9,1	166,8	4,1	31,3
DMS	2,7	24,1	0,1	0,2	-	20,1	-	7,9	-	4,3
	----- Teste F -----									
P	41,1**	23,5**	99,6**	0,2 ^{ns}	23,7**	9,1**	29,8**	23,2**	17,4**	14,7**
Si	10,2**	20,5**	6,9*	26,3**	2,1 ^{ns}	23,4**	1,8 ^{ns}	20,8**	2,9 ^{ns}	19,8**
P x Si	17,1*	0,1 ^{ns}	7,3*	1,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,2 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,8 ^{ns}
C.V. (%)	8,6	10,4	10,4	13,8	14,6	11,3	19,3	17,5	11,8	16,8

DMS = diferença mínima significativa; C.V. = coeficiente de variação; *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

A diminuição do acúmulo de nitrogênio na raiz, com a maior proporção de N amoniacal, ocorreu na ausência e na presença de Si (Figura 7A), possivelmente, devido ao efeito tóxico do NH_4^+ nas plantas, causando danos ao sistema radicular e diminuindo a absorção de nutrientes (LI et al., 2014).

Com o uso de silício, tem-se maior acúmulo desse elemento nas plantas, independentemente da concentração de amônio estudada (Figura 7B), devido ao fornecimento desse elemento na solução nutritiva, indicando que plantas de maracujazeiro não apresentam restrição para a absorção de silício, tendo maior acúmulo de Si quando esse elemento é adicionado na solução nutritiva.

O aumento da concentração de NH_4^+ na solução nutritiva diminuiu os acúmulos dos cátions K, Ca e Mg na parte aérea e na raiz das mudas em relação ao tratamento sem excesso de amônio (Tabela 7). Em outras espécies, também houve diminuição nos acúmulos desses cátions sob elevadas concentrações de NH_4^+ na

solução nutritiva, como *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-VILLAREAL et al., 2015); *Fragaria* spp. (CHOI; LATIGUI; LEE, 2011), e *Eucalyptus urophylla* (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014). O desequilíbrio entre esses íons ocorre devido ao efeito antagônico de NH_4^+ em relação a esses cátions, por serem íons que competem pelos mesmos sítios de absorção (MARSCHNER, 2012). Esse desbalanço iônico ocorre em razão do aumento do influxo de NH_4^+ e de efluxo de cátions na membrana plasmática, havendo extrusão destes íons para o vacúolo celular, podendo causar sintomas de deficiências nutricionais às plantas (MENDONZA-VILLAREAL et al., 2015).

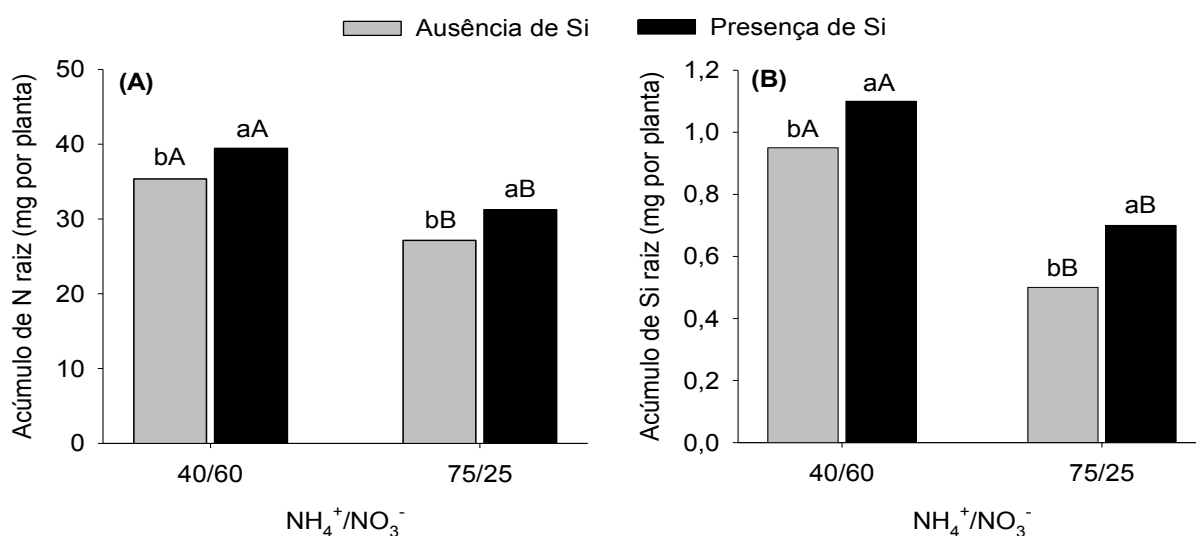


Figura 7. Acúmulo de nitrogênio (A) e de silício (B) na matéria seca da raiz de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Entretanto, na presença do elemento benéfico, as mudas de maracujazeiro apresentaram maior acúmulo de K, de Ca e de Mg na parte aérea, comparados com as plantas cultivadas sem a aplicação de Si na solução nutritiva, independentemente da concentração de amônio (Tabela 7).

Este efeito do Si na absorção de cátions varia com as espécies de plantas e as condições de estresses (CHEN et al., 2011). Em plantas de cevada (LIANG, 1999), também foi observado que o Si promoveu aumentos nos teores foliares de K, Ca e Mg das plantas cultivadas em solução nutritiva com e sem estresse por excesso de NaCl. Uma possível explicação da influência do Si sobre a absorção de

K^+ está relacionada ao fato de que o Si estimula a atividade da H^+ -ATPase nas membranas, enzima que está diretamente ligada à absorção de K pelas plantas (LIANG, 1999). Os mecanismos pelos quais o Si estimula a absorção de outros cátions ainda são pouco estudados.

4.2.2 Índice de cor verde e de vazamento de eletrólitos das folhas e fisiologia

Houve interação entre proporções de NH_4^+ e NO_3^- e silício apenas sobre o índice de cor verde e o índice de vazamento de eletrólitos das folhas de maracujazeiro (Tabela 8).

Tabela 8. Resumo da análise de variância e resultados médios do índice de cor verde das folhas (ICV), do índice de vazamento de eletrólitos (IVE), da concentração interna de CO_2 , da transpiração, da condutância estomática e da fotossíntese de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- e ausência e presença de silício na solução nutritiva.

Proporções de NH_4^+/NO_3^- (P)	ICV	IVE	Concentração interna de CO_2	Transpiração	Condutância estomática	Fotossíntese líquida
		%	$\mu mol\ mol^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
40/60	40,6	23,1	182,9	4,0	0,092	9,8
75/25	27,5	38,9	171,3	4,6	0,098	9,3
DMS	5,6	3,0	-	0,2	-	-
Silício (Si)						
Ausência	29,0	35,6	164,4	4,2	0,104	9,2
Presença	39,1	26,4	189,4	3,4	0,087	11,0
DMS	5,6	3,0	14,2	0,2	0,008	1,3
-----Teste F-----						
P	24,6**	124,7**	3,0 ^{ns}	7,4**	1,9 ^{ns}	0,9 ^{ns}
Si	14,9**	41,9**	14,4**	48,3**	17,0**	4,0*
P x Si	7,1*	7,1*	4,4 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,2 ^{ns}	1,8 ^{ns}
C.V. (%)	10,3	10,2	8,5	6,5	9,8	14,6

DMS = diferença mínima significativa; C.V. = coeficiente de variação; *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Na presença do silício, sob excesso de amônio, houve aumento do índice de cor verde das folhas, fato que não ocorreu na menor proporção NH_4^+ na solução nutritiva (Figura 8A). Isso é justificado devido à maior absorção de Si pelas plantas sob estresse, pois houve correlação positiva do acúmulo de Si e o índice de cor verde ($r = 0,80^{**}$).

O excesso de amônio diminui os valores do índice de cor verde das folhas, indicando os danos deste cátion nas plantas (HU et al., 2015; CRUZ et al., 2014). Esse efeito, possivelmente, deve-se ao fato de que toxicidade de NH_4^+ aumenta o

conteúdo de espécies reativas de oxigênio, O_2^- e H_2O_2 , que podem causar peroxidação oxidativa, diminuindo os teores de clorofila nas folhas (HU et al., 2015). Acrescenta-se que houve evolução da desordem nutricional caracterizada por sintomas de clorose e necrose nas folhas mais velhas, nas plantas cultivadas sob estresse por amônio.

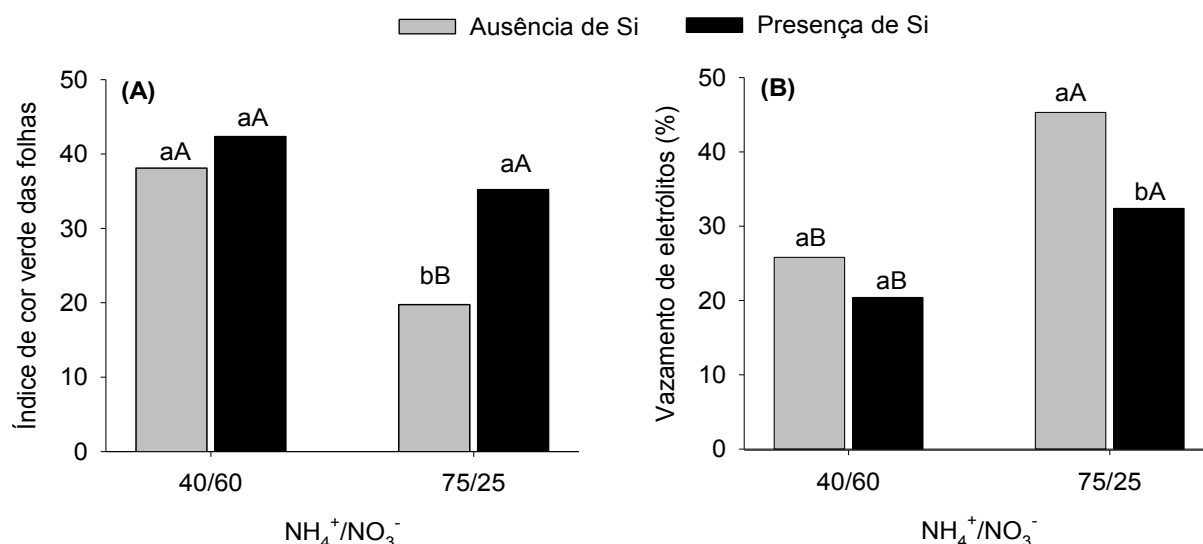


Figura 8. Índice de cor verde (A) e índice de vazamento de eletrólitos (B) nas folhas de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

O aumento da concentração de amônio, com ou sem Si, aumentou o índice de vazamento de eletrólitos das folhas do maracujazeiro (Figura 8B). Estes efeitos ocorrem devido aos danos nas membranas e à ruptura da parede celular, causando maior vazamento de eletrólitos celular (KOCHANOVÁ et al., 2014). Este fato também foi observado em plantas de *Arabidopsis thaliana* (HELALI et al., 2010) cultivadas sob elevadas concentrações de amônio.

Entretanto, quando o silício foi fornecido na solução nutritiva, sob estresse por amônio, houve menor índice de vazamento de eletrólitos (Figura 8B), possivelmente devido ao aumento da absorção de Si e de Ca pela planta, pois houve correlação negativa entre o índice de vazamento de eletrólitos e o Si ($r = -0,71^{**}$) e também o Ca ($r = -0,71^{**}$). Isso, provavelmente, está relacionado ao fato de o silício aumentar a integridade física das membranas das plantas sob diferentes estresses abióticos, como *Zea mays* (KOCHANOVÁ et al., 2014) e *Cucumis melo* (LI et al., 2012). Este

efeito deve-se ao fato de que o mesmo pode ligar-se com complexos monofenóis livres, formando Si-fenol, evitando o acúmulo de espécies reativas de oxigênio nas organelas das células (MAKSIMOVIC et al., 2007), podendo reduzir a peroxidação lipídica, com a manutenção das estruturas de organelas, como cloroplastos, e de compostos orgânicos (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014; KOCHANOVÁ et al., 2014). Além disso, tem-se o efeito do Ca, que confere maior integridade estrutural das membranas das organelas (KOCHANOVÁ et al., 2014), colaborando para a diminuição do índice de vazamento de eletrólitos.

O excesso de amônio, 75/25%, na solução nutritiva aumentou a transpiração das folhas das mudas de maracujazeiro, em relação a menor proporção de NH_4^+ , 40/60% (Tabela 8). Isso ocorreu, provavelmente, devido ao excesso de amônio ocasionar diminuição do valor pH intracelular e desequilíbrio osmótico, podendo aumentar o conteúdo de espécies reativas de oxigênio, induzindo o estresse oxidativo, o que resulta em alterações fisiológicas, como aumento da taxa de transpiração (BITTSÁNSZKY et al., 2015; BORGOGNONE et al., 2013).

O silício diminuiu a transpiração e a condutância estomática e aumentou a concentração interna de CO_2 e a fotossíntese das mudas de maracujazeiro, independentemente das proporções de NH_4^+ e NO_3^- (Tabela 8). Este efeito do silício na fisiologia, especialmente na fotossíntese, é relatado na literatura, pelo fato deste elemento acumular-se na região abaxial das folhas, tornando-as mais eretas e com maior capacidade de absorção de luz (FENG et al., 2010), com incrementos na área fotossintética foliar (KURDALI et al., 2013). Em complemento a isso, o Si pode formar dupla camada silicatada sobre a epiderme da folha, controlando a condutância estomática e a concentração interna de CO_2 , podendo favorecer a eficiência fotossintética das plantas (KOCHANOVÁ et al., 2014).

Este benefício do Si na fisiologia das plantas, com diminuição da condutância estomática e da transpiração, resultando em maior eficiência fotossintética e crescimento, também foi constatado em *Zea mays* (VACULÍKOVÁ et al., 2014) e em *Cicer arietinum* (KURDALI et al., 2013).

4.2.3 Crescimento, eficiência de uso do N e massa da matéria seca

Houve interação entre as proporções de amônio e nitrato e concentrações de silício para o diâmetro do caule, o comprimento da raiz, a eficiência de uso de nitrogênio e a matéria seca da raiz. A área foliar, a eficiência de uso de nitrogênio e matéria seca da parte aérea foram influenciadas pelos efeitos individuais das proporções de nitrato e amônio e das concentrações de Si (Tabela 9).

O excesso de amônio na solução nutritiva diminuiu a área foliar das mudas de maracujazeiro, independentemente da concentração de Si (Tabela 9). Isso deve-se ao efeito tóxico do NH_4^+ às plantas de maracujazeiro, que diminuiu o acúmulo de nitrogênio (Tabela 7), refletindo na área foliar das mudas.

Tabela 9. Resumo da análise de variância e resultados médios da altura de plantas, do diâmetro do caule, da área foliar, do comprimento da raiz e da eficiência de uso do N (EUN), e matéria seca da raiz e da parte aérea de mudas de maracujazeiro em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva.

Proporções de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ (P)	Diâmetro do caule	Área foliar	Comprimento da raiz	EUN		Matéria seca	
				Raiz	Parte aérea	Raiz	Parte aérea
	mm	cm^2	cm	----- g g ² -----		--- g por planta ---	
40/60	4,3	736,2	27,6	55,7	193,3	1,5	7,1
75/25	3,4	536,3	23,4	46,9	130,6	1,2	5,3
DMS	0,2	40,3	1,2	4,7	20,9	0,1	0,7
Silício (Si)							
Ausência	3,6	574,2	24,4	47,9	152,1	1,2	5,6
Presença	4,1	708,3	26,6	54,7	174,7	1,4	6,8
DMS	0,2	40,3	1,2	4,7	20,9	0,1	0,7
----- Teste F -----							
P	192,6**	116,7*	58,8**	15,6**	40,4**	45,7**	31,5**
Si	53,2**	60,7**	15,8**	9,5**	13,9*	16,9**	12,3**
P x Si	7,2*	1,0 ^{ns}	15,8**	13,7**	0,1 ^{ns}	7,1*	0,2 ^{ns}
C.V. (%)	3,7	6,5	4,7	9,7	13,6	6,9	11,7

DMS = diferença mínima significativa; C.V. = coeficiente de variação; *, ** e ^{ns} = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Houve diminuição no diâmetro do caule e no comprimento de raiz das plantas cultivadas sob excesso de amônio, quando comparados com a menor proporção do nutriente (Tabela 9). Este efeito do amônio, causando prejuízos sobre variáveis de crescimento das plantas, especialmente no comprimento radicular e no diâmetro do caule, também foi observado em plantas de *Eustoma grandiflorum* (MENDOZA-

VILLAREAL et al., 2015); de *Eucalyptus urophylla* (GUIMARÃES; CAIRO; NEVES, 2014), e de *Solanum lycopersicum* (BORGOGNONE et al., 2013).

Em contrapartida, a presença de silício, em condições de excesso de NH_4^+ , promoveu incrementos no diâmetro do caule (Figura 9A) e no comprimento da raiz (Figura 9B). Este efeito benéfico do silício nas plantas sob estresse pode ser atribuído ao fato de que esse elemento incrementou o acúmulo de N na raiz (Figura 7A) e o índice de cor verde das folhas (Figura 8A), e diminuiu o estresse, medido pelo índice de vazamento de eletrólitos foliar (Figura 8B).

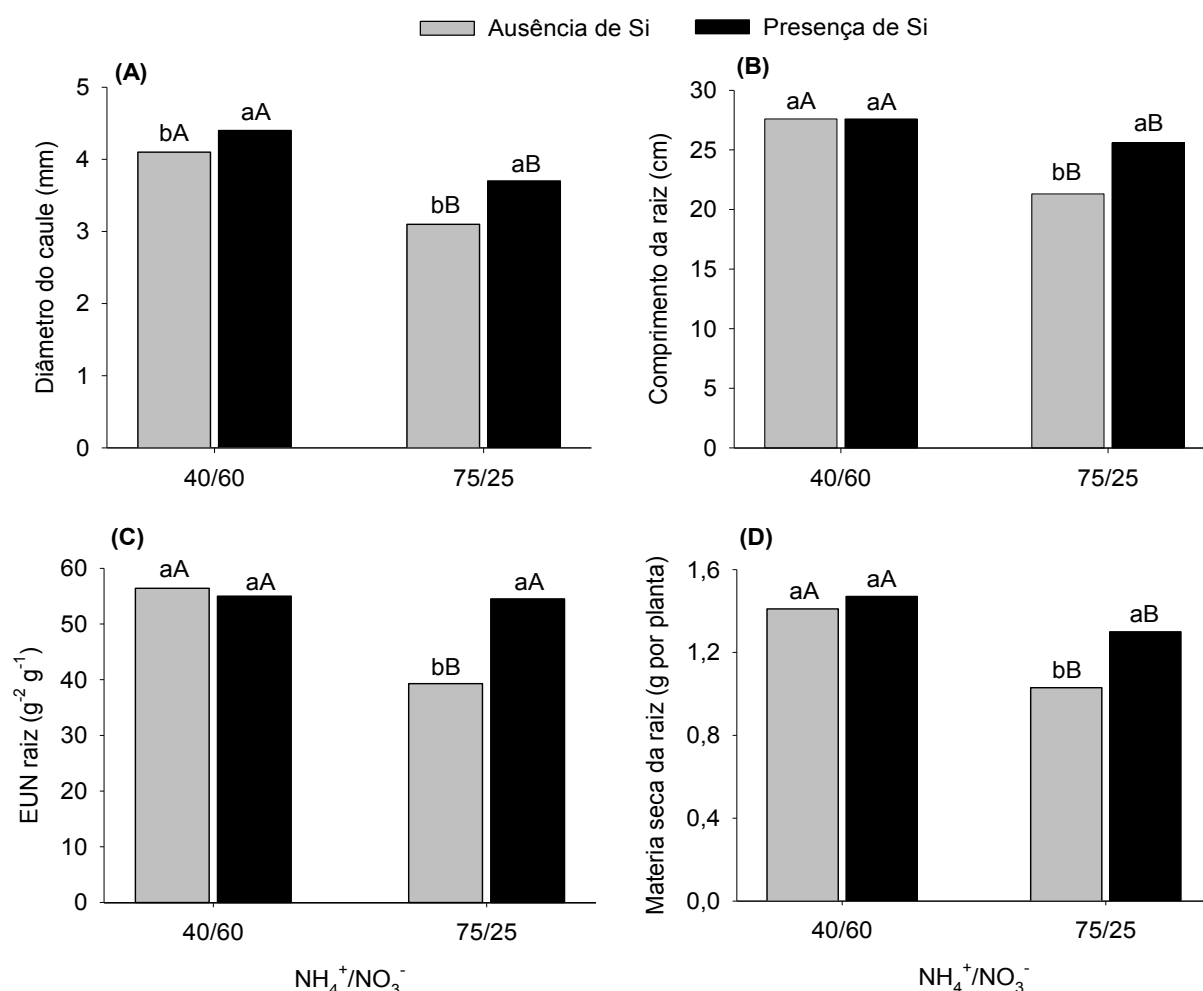


Figura 9. Diâmetro do caule (A), comprimento da raiz (B) eficiência de utilização de N na raiz (C) e matéria seca da raiz (D) de mudas de maracujazeiro, em função de proporções de NH_4^+ e NO_3^- , e ausência e presença de silício na solução nutritiva. Médias seguidas por letras distintas, minúsculas, diferem as concentrações de silício dentro das proporções de NH_4^+ e NO_3^- ; e maiúsculas, diferem as proporções de NH_4^+ e NO_3^- dentro das concentrações de silício, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

O uso de silício, em plantas sob estresse, também promoveu maior comprimento do sistema radicular de outras espécies, como *Zea mays*, cultivadas em solução nutritiva sob estresse com excesso de NaCl (KOCHANOVÁ et al., 2014).

O excesso de NH_4^+ , sem uso de Si, diminuiu a eficiência de uso do N na raiz (EUN raiz) (Figura 9C) e a matéria seca da raiz (Figura 9D), quando comparado com a menor proporção de NH_4^+ . O excesso de amônio em solução nutritiva causa elevado acúmulo desse cátion nos cloroplastos, podendo bloquear o metabolismo do complexo enzimático GS-GOGAT, responsável pela assimilação de N pelas plantas (BITTSÁNSZKY et al., 2015), refletindo na diminuição da EUN. Associado a isto, a toxicidade de amônio diminuiu da EUN raiz, sob ausência de Si, possivelmente, devido a prejuízos na absorção de nutrientes que apresentam função fisiológica estrutural e/ou enzimática importante, envolvida na conversão do N em matéria seca, pois houve correlação positiva entre a EUN raiz e o acúmulo de N ($r = 0,88^{**}$); de K ($r = 0,78^{**}$); de Ca ($r = 0,81^{**}$), e de Mg ($r = 0,76^{**}$) na raiz das mudas, retratando que a diminuição da EUN raiz esteve associada com menor acúmulo destes nutrientes.

O silício promoveu incremento na área foliar, na EUNpa e na matéria seca da parte aérea, independentemente da proporção de NH_4^+ e NO_3^- estudadas (Tabela 9). No entanto, houve interação, indicando que a presença do elemento benéfico proporcionou maior diâmetro do caule (Figura 9A), comprimento da raiz (Figura 9B), EUN raiz (Figura 9C) e matéria seca da raiz (Figura 9D) das mudas cultivadas em solução nutritiva, com excesso de amônio.

O efeito do Si sobre o aumento da EUN da parte aérea também foi verificado em plantas de *Cicer arietinum* (KURDALI et al., 2013) e de *Oriza sativa* (DETMANN et al., 2012). É relatado que o fornecimento de Si no meio de cultivo pode interagir positivamente com nutrientes, a exemplo do N e dos cátions, e aumentar a eficiência nutricional, com maiores respostas de crescimento das plantas (LIANG, 1999).

O efeito benéfico do silício sobre a matéria seca da parte aérea das mudas, independentemente da concentração de NH_4^+ na solução nutritiva (Tabela 9), é explicado pelo acúmulo desse elemento nas plantas, pois observou-se que houve correlação positiva do acúmulo de Si na parte aérea e a matéria seca da parte aérea ($r = 0,72^{**}$), e do acúmulo de Si na raiz e a matéria seca da raiz ($r = 0,61^{**}$).

Portanto, este incremento da matéria seca da parte aérea com o acúmulo de Si recebeu contribuição do efeito deste elemento, conferido na área foliar e no diâmetro do caule.

Observa-se ainda que o uso de Si promoveu incremento na produção de matéria seca da raiz (Figura 9D) sob excesso de amônio devido ao maior acúmulo desse elemento nessas condições (Figura 7B) e à eficiência de uso de N na raiz (Figura 9C), pois houve correlação entre acúmulo de Si na raiz e a EUN raiz ($r = 0,80^{**}$) e a matéria seca das raízes ($r = 0,94^{**}$).

Portanto, o uso de Si como elemento benéfico sobre a toxicidade de N amoniacal no meio de cultivo pode constituir uma técnica importante para o cultivo de mudas de maracujazeiro, especialmente em cultivo hidropônico, onde as plantas podem ser submetidas a eventual estresse nutricional, como o causado pelo excesso de NH_4^+ . É importante realizar estudos novos, relacionando o papel do Si sob condições de estresse por excesso de amônio no meio de cultivo em outras espécies de frutíferas, pois estes efeitos podem ser influenciados por fatores genéticos ou morfológicos.

4.3 Experimento III: Taxa de crescimento relativo e marcha de acúmulo de nutrientes e de silício em mudas de maracujazeiro

4.3.1 Acúmulo de nutrientes e de Si

Houve efeito do período de cultivo, em graus-dia, sobre o acúmulo de todos os nutrientes e de Si na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira das mudas de maracujazeiro (Tabela 10).

Observou-se que o acúmulo de nutrientes foi variável entre os órgãos das plantas, em função do somatório de graus-dia em cada época de cultivo (Figuras 10 e 11). De modo geral, a ordem de acúmulo de nutrientes nos órgãos foi: folhas > caule > raiz, para N, Ca, Mg, S e B. Já para os nutrientes P, K, Zn, Mn e Cu, a ordem foi: folhas > raiz > caule. Quanto ao Si, o acúmulo desse elemento nos respectivos órgãos das plantas apresentou valores semelhantes no final do

experimento, com pequena superioridade da raiz, seguido das folhas e do caule (Figura 11F).

Tabela 10. Resumo da análise de variância do acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe, Cu e Si na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.

Nutriente	Graus-dia	Raiz	Caule	Folha	Planta inteira
N	Teste F	530,8**	1019,2**	593,6**	1077,5**
	C.V	13,9	13,2	13,8	10,5
P	Teste F	600,9**	833,4**	667,2**	1533,2**
	C.V	14,6	12,8	13,7	9,1
K	Teste F	546,3**	855,5**	477,6**	1138,9**
	C.V	14,3	12,7	13,8	9,5
Ca	Teste F	485,5**	847,7**	723,8**	1016,4**
	C.V.	13,7	12,8	13,6	11,4
Mg	Teste F	530,4**	902,5**	627,7**	1074,9**
	C.V.	14,4	13,0	13,6	10,6
S	Teste F	601,1**	833,1**	667,2**	1370,0**
	C.V.	14,6	12,8	13,7	9,6
B	Teste F	546,3**	994,2**	969,0**	1480,7**
	C.V.	14,3	13,1	13,5	10,7
Zn	Teste F	692,8**	967,1**	722,9**	1754,8**
	C.V.	15,0	13,1	13,7	9,08
Mn	Teste F	681,9**	862,9**	683,1**	1180,8**
	C.V.	14,7	12,7	13,9	10,6
Fe	Teste F	152,2**	757,2**	448,3**	455,6**
	C.V.	14,0	12,6	12,5	9,4
Cu	Teste F	497,2**	913,6**	164,8**	2700,8**
	C.V.	14,1	12,7	10,1	6,6
Si	Teste F	566,0**	1141,9**	981,8**	3025,1**
	C.V.	14,3	14,1	14,1	7,3

C.V. = coeficiente de variação (%); ** = significativo ao nível de $P \leq 0,01$, pelo teste F.

O acúmulo médio dos macronutrientes na planta inteira seguiu a seguinte ordem: N > K > Ca > P > Mg > S (Figura 10), e para os micronutrientes e Si, a ordem foi: Si > Mn > Fe > B > Zn > Cu (Figura 11).

O maior requerimento de nitrogênio pelas mudas do maracujazeiro deve-se, possivelmente, à atuação do nutriente na composição orgânica e em inúmeros compostos constituintes do tecido vegetal. Quanto ao K, o alto requerimento deve-se à baixa afinidade do mesmo na ativação de dezenas de enzimas, havendo a necessidade de alto teor do elemento no citosol para desempenhar seu papel metabólico (MARSCHNER, 2012).

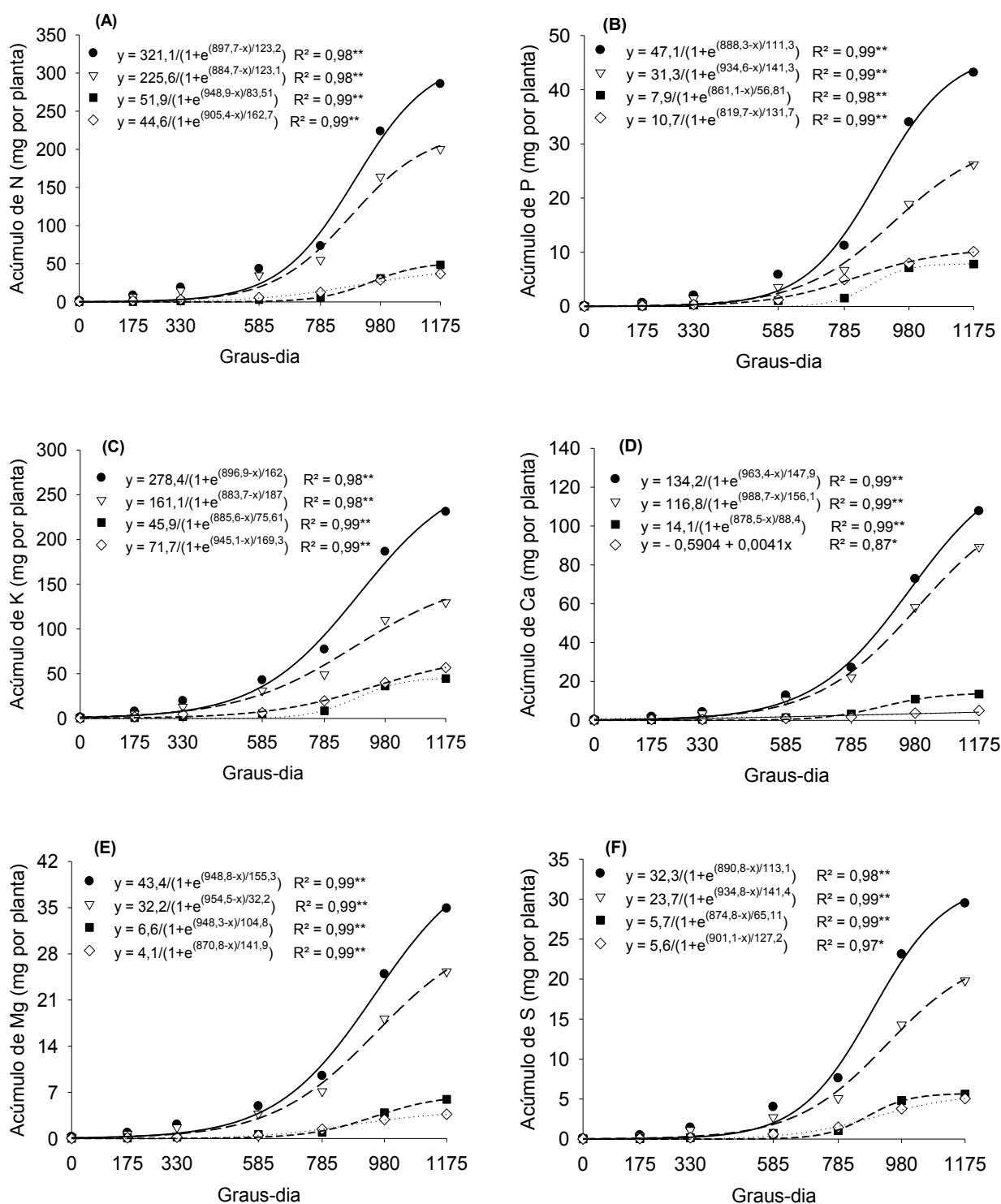


Figura 10. Acúmulo de N (A), P (B), K (C), Ca (D), Mg (E) e S (F) na raiz (◇), no caule (■), nas folhas (▽) e na planta inteira (●) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. *, ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F.

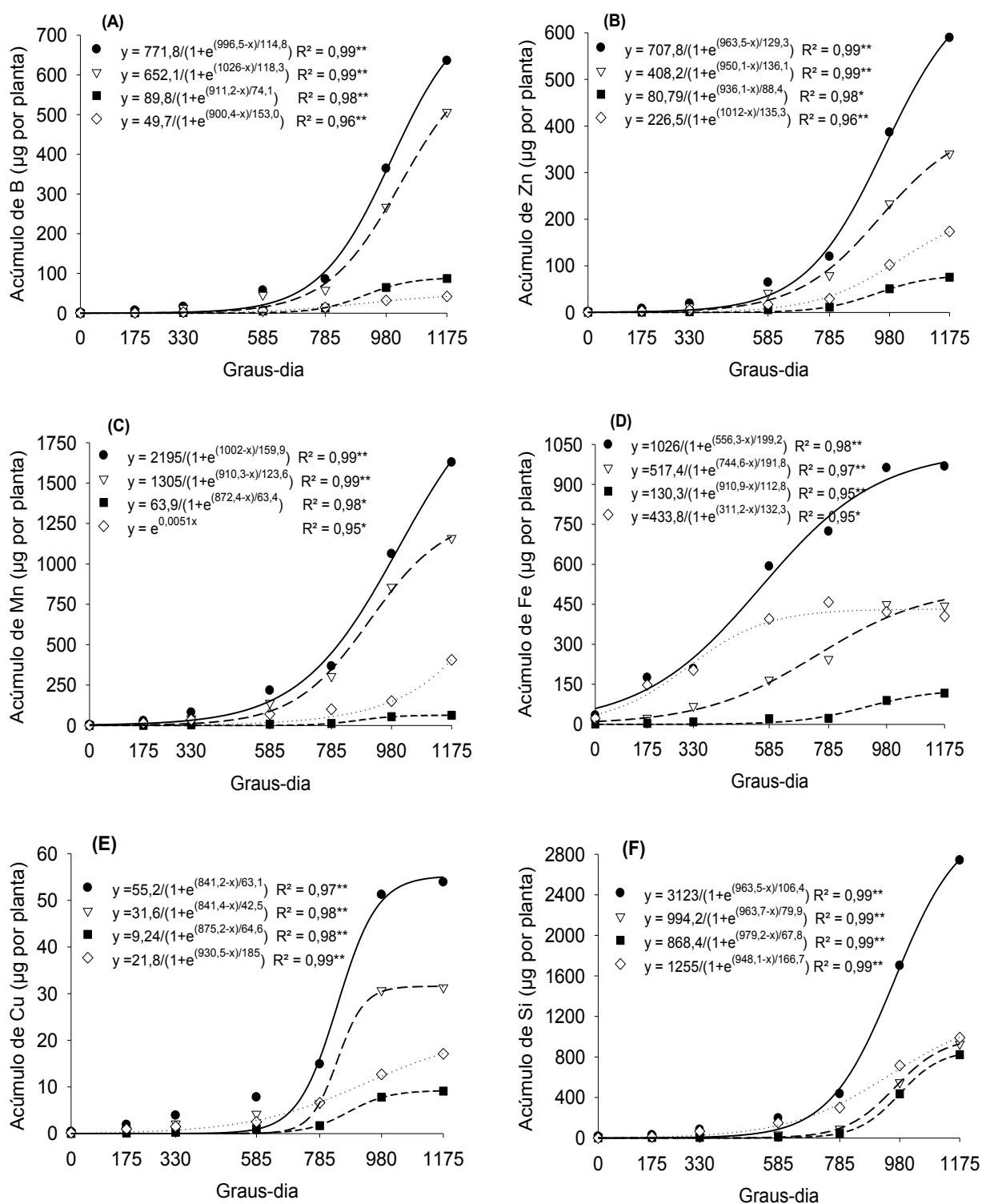


Figura 11. Acúmulo de B (A), Zn (B), Mn (C), Fe (D), Cu (E) e Si (F) na raiz (◇), no caule (■), nas folhas (▽) e na planta inteira (●) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. *, ** = significativo ao nível de $P \leq 0,05$ e de $P \leq 0,01$, respectivamente, pelo teste F.

Na planta inteira, a quantidade dos elementos químicos acumulados nos períodos de 0 a 785; 786 a 980, e 986 a 1.175 graus-dia, em mg por planta para macronutrientes e µg por planta para micronutrientes e Si, e em percentagem do total, respectivamente, foi: N = 73 (25%), 150 (53%) e 59 (22%); P = 11 (27%), 23 (57%) e 7 (16%); K = 77 (34%), 109 (47%) e 45 (19%); Ca = 27 (25%), 46 (43%) e 35 (32%); Mg = 9,5 (27%), 15,5 (45%) e 10 (28%) e S = 9 (25%), 19 (53%) e 8 (22%); B = 86 (13,5%), 278 (42,5%) e 271 (44%); Zn = 120 (20%), 266 (46%) e 203 (34%); Mn = 418 (29%), 623 (38%) e 587 (33%); Fe = 837 (40%), 586 (28%) e 683 (32%); Cu = 14 (34%), 37 (53%) e 8 (13%), e Si = 504 (21%), 1.083 (47%) e 756 (32%).

Observa-se que a maior quantidade de nutrientes e de Si acumulados pelas mudas de maracujazeiro ocorreu no período de 786 a 980 graus-dia, exceto para o Fe, o Cu e o B (Figura 11). O ferro e o cobre apresentaram maiores percentagens de acúmulo até 785 graus-dia, em relação aos períodos posteriores, o que mostra a exigência desses micronutrientes pelas mudas na fase inicial de crescimento. Já o boro foi mais requerido entre 981 a 1.175 graus-dia, dada a maior proporção de acúmulo desse micronutriente nessa fase. Essas informações são úteis para o aprimoramento dos programas de adubação mais eficientes em viveiros de mudas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), no sentido de que exprimem as quantidades dos nutrientes a serem fornecidos nas diferentes fases de desenvolvimento das mudas.

Especificamente para o Si, pode-se sugerir que o maracujazeiro é uma planta que não apresenta restrição à absorção desse elemento nos diferentes órgãos, dado o maior acúmulo desse elemento em relação a todos os micronutrientes (Figura 11F).

Cabe salientar que as curvas de acúmulos de nutrientes dos diferentes órgãos e da planta inteira do maracujazeiro seguiram a curva sigmoide, situação também relatada por Fey et al. (2009), em estudos sobre marcha de crescimento e acúmulo de nutrientes em mudas de *Passiflora edulis*.

4.3.2 Taxa de acumulação líquida organogênica e relativa de nutrientes e de Si

A taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) apresentou variação entre os nutrientes ao longo do período de cultivo das mudas, sendo que as maiores TALONs ocorreram entre 786 - 980 graus-dia, para todos os nutrientes e Si, na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira (Tabelas 11 e 12). Neste mesmo intervalo de graus-dia, os maiores valores de taxa de acumulação relativa de nutrientes (TARN) foram verificados para P, Ca, S, B, Zn, Mn e Si. Entretanto, observa-se que houveram maiores TARNs para N, K, Mg, Fe e Cu (Tabelas 11 e 12), no início do desenvolvimento das plantas, caracterizado pelo intervalo entre 0 e 175 graus-dia.

Tabela 11. Taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) e taxa de acumulação relativa (TARN) de N, P, K, Ca, Mg e S na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.

Órgão	Período	N	P	K	Ca	Mg	S
	Graus-dia	-----mg por g por graus-dia-----					
		TALON					
Raiz	0 - 175	0,0005	0,0001	0,0007	0,0001	0,0001	0,0001
	176 - 330	0,0003	0,0001	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002
	331 - 585	0,0012	0,0007	0,0009	0,0003	0,0005	0,0003
	586 - 785	0,0088	0,0033	0,0159	0,0010	0,0011	0,0010
	786 - 980	0,0374	0,0101	0,0481	0,0046	0,0034	0,0058
	981 - 1175	0,0055	0,0017	0,0100	0,0008	0,0006	0,0005
Caule	0 - 175	0,0010	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	176 - 330	0,0087	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
	331 - 585	0,0825	0,0005	0,0016	0,0005	0,0003	0,0003
	586 - 785	0,0172	0,0033	0,0021	0,0011	0,0004	0,0004
	786 - 980	0,2065	0,0431	0,2289	0,0633	0,0242	0,0311
	981 - 1175	0,0279	0,0001	0,0118	0,0036	0,0024	0,0002
Folha	0 - 175	0,0039	0,0003	0,0030	0,0007	0,0003	0,0002
	176 - 330	0,0112	0,0013	0,0107	0,0029	0,0014	0,0010
	331 - 585	0,3118	0,0057	0,0349	0,0134	0,0040	0,0030
	586 - 785	0,0333	0,0199	0,0299	0,0181	0,0053	0,0040
	786 - 980	1,4436	0,1448	0,8179	0,4724	0,1465	0,1180
	981 - 1175	0,0605	0,0119	0,0349	0,0434	0,0104	0,0082
		TARN					
Planta inteira	0 - 175	0,2465	0,0214	0,2255	0,0529	0,0213	0,0181
	176 - 330	0,1738	0,0197	0,1905	0,0399	0,0210	0,0187
	331 - 585	0,1172	0,0194	0,1107	0,0410	0,0129	0,0152
	586 - 785	0,0913	0,0183	0,1058	0,0439	0,0155	0,0139
	786 - 980	0,2058	0,0243	0,1497	0,0562	0,0201	0,0248
	981 - 1175	0,0467	0,0072	0,0341	0,0262	0,0066	0,0057

Embora as quantidades acumuladas de N, K, Mg, Fe e Cu sejam baixas, as quantidades acumuladas por unidade preexistente de matéria seca são altas, indicando a importância desses elementos na fase inicial de cultivo. Especificamente para o Fe e o Cu, essas informações estão ligadas aos resultados apresentados nas Figuras 11D e 11E, respectivamente, havendo maiores percentagens de acúmulos desses micronutrientes no início do desenvolvimento das mudas, conforme discutido anteriormente.

Tabela 12. Taxa de acumulação líquida organogênica (TALON) de B, Zn, Mn, Fe, Cu e Si na raiz, no caule e nas folhas e taxa de acumulação relativa (TARN) na planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.

Órgão	Período	B	Zn	Mn	Fe	Cu	Si
	Graus-dia	-----µg por g por graus-dia-----					
		TALON					
Raiz	0 - 175	0,0003	0,0011	0,0058	0,0509	0,0003	0,0034
	176 - 330	0,0003	0,0005	0,0038	0,0127	0,0003	0,0094
	331 - 585	0,0016	0,0047	0,0149	0,0803	0,0005	0,0350
	586 - 785	0,0099	0,0157	0,0413	0,2030	0,0049	0,1857
	786 - 980	0,0416	0,1664	0,1232	0,7909	0,0146	0,9663
	981 - 1175	0,0065	0,0379	0,1211	0,0923	0,0027	0,1679
Caule	0 - 175	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0003
	176 - 330	0,0010	0,0009	0,0002	0,0006	0,0002	0,0002
	331 - 585	0,0020	0,0019	0,0021	0,0060	0,0003	0,0023
	586 - 785	0,0045	0,0032	0,0028	0,0521	0,0004	0,0190
	786 - 980	0,4256	0,3271	0,3523	0,8355	0,0503	3,2102
	981 - 1175	0,0287	0,0299	0,0143	0,0401	0,0021	0,4315
Folha	0 - 175	0,0030	0,0026	0,0072	0,0122	0,0004	0,0076
	176 - 330	0,0101	0,0103	0,0383	0,0589	0,0018	0,0321
	331 - 585	0,0621	0,0053	0,1835	0,1904	0,0040	0,1083
	586 - 785	0,0237	0,0600	0,2572	0,4035	0,0036	0,0994
	786 - 980	2,7292	2,0354	6,3761	2,1423	0,3112	3,6653
	981 - 1175	0,3159	0,1528	0,0542	0,7666	0,0028	0,1708
		TARN					
Planta inteira	0 - 175	0,1915	0,2305	0,9113	4,9145	0,0505	0,7751
	176 - 330	0,1500	0,1785	0,8543	1,8937	0,0327	1,2013
	331 - 585	0,1946	0,2147	0,6472	1,4474	0,0181	0,5128
	586 - 785	0,0953	0,1862	0,6618	0,7341	0,0226	0,8340
	786 - 980	0,3693	0,3516	0,8892	0,8631	0,0479	2,3415
	981 - 1175	0,1884	0,1563	0,4409	0,5402	0,0063	0,5675

Verifica-se também que, em todos os períodos avaliados, a maior TALON, para todos os nutrientes e silício, ocorreu nas folhas, em relação ao caule e à raiz (Tabelas 11 e 12).

4.3.3 Crescimento, massa da matéria seca e taxa de crescimento relativo

O tempo de cultivo, em graus-dia, causou efeito sobre a altura de plantas, o diâmetro do caule, o comprimento de raiz e a massa da matéria seca da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira de mudas de maracujazeiro (Tabela 13).

Tabela 13. Resumo da análise de variância e resultados médios da altura de plantas, do diâmetro do caule, do comprimento de raiz e da massa da matéria seca da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.

Período	Altura de plantas	Diâmetro do caule	Comprimento de raiz	Massa da matéria seca			
				Raiz	Caule	Folha	Planta inteira
Graus-dia	cm	mm	cm	----- g por planta -----			
0	3,2	1,2	11,1	0,02	0,01	0,06	0,09
175	6,7	1,5	13,3	0,07	0,03	0,16	0,26
330	7,6	1,7	20,5	0,11	0,06	0,36	0,53
585	11,3	2,5	25,5	0,23	0,15	0,83	1,21
785	14,8	3,0	26,2	0,51	0,28	1,35	2,14
980	45,7	3,9	28,1	1,06	1,29	3,70	6,07
1175	68,5	4,1	29,0	1,31	1,80	4,60	7,71
Teste F	959,5**	26,3**	106,5**	326,2**	1.193,8**	447,6**	1.115,1**
C.V. (%)	10,9	7,6	6,8	13,9	12,9	13,7	9,4

C.V. = coeficiente de variação; ** = significativo ao nível de $P \leq 0,01$, pelo teste F.

A altura de plantas apresentou crescimento lento até 785 graus-dia, representando apenas 28% da altura final das mudas, e alto após esse período (Figura 12A). No entanto, o diâmetro do caule apresentou incremento com ajuste linear em função do acúmulo de graus-dia após o transplântio (Figura 12B).

Para o comprimento radicular, verifica-se que houve rápido crescimento até 585 graus-dia, havendo, a partir desse período, menores incrementos em função dos graus-dia acumulados (Figura 12C). Isso é explicado pelo maior desenvolvimento do sistema radicular das mudas na fase inicial de crescimento, em detrimento da parte aérea, sendo importante tanto para a sustentação das plantas, quanto para a absorção de água e nutrientes (MARSCHNER, 2012).

Houve lento acúmulo de matéria seca das mudas até 585 graus-dia, entretanto, a partir desse período, verificaram-se maiores incrementos de matéria seca em todos os órgãos das plantas, especialmente nas folhas, que representaram 60% da matéria seca total das mudas. A matéria seca do caule e da raiz corresponderam a 23% e 17% da matéria seca da planta inteira, respectivamente (Figura 12d).

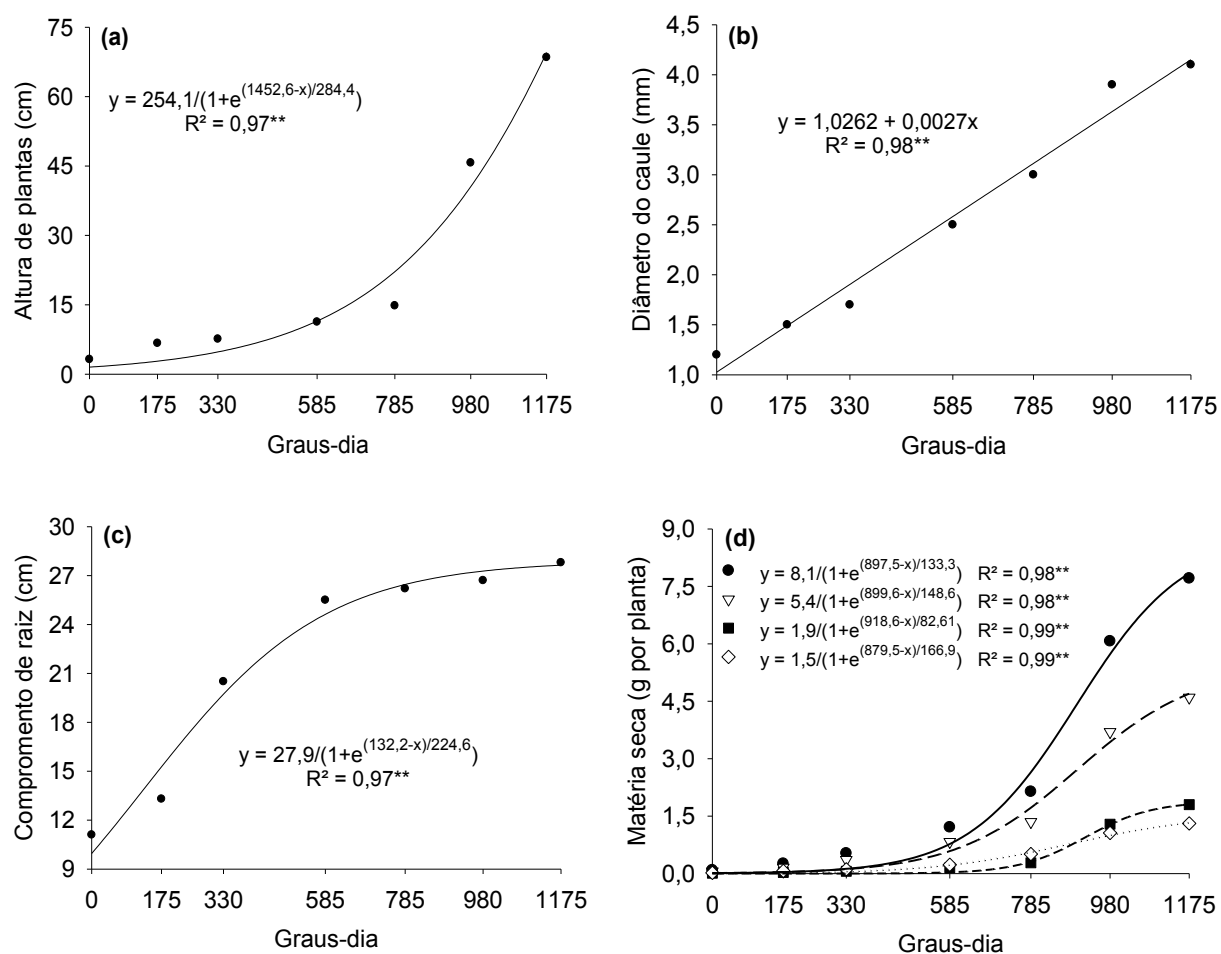


Figura 12. Altura de plantas (a), diâmetro do caule (b), comprimento de raiz (c) e massa da matéria seca (d) da raiz (◇), do caule (■), das folhas (▽) e da planta inteira (●) de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia. ** = significativo ao nível de $P \leq 0,01$, pelo teste F.

A maior participação das folhas na composição da matéria seca total das mudas, no final do experimento, deve-se ao fato de as folhas serem o órgão com maior dreno de fotoassimilados (MARSCHNER, 2012), importante para o incremento da área foliar e da taxa fotossintética. Em complemento, as folhas apresentaram

maiores acúmulos de macro e micronutrientes e silício (Figuras 10 e 11), e maiores TALON e TARN (Tabelas 11 e 12) em todos os intervalos de graus-dia avaliados, sendo, portanto, variáveis determinantes para a maior formação de matéria seca foliar, em relação aos outros órgãos das plantas.

A altura de plantas (Figura 12A) foi a variável de crescimento que mais contribuiu para o incremento da matéria seca das plantas, dada a correlação positiva com a matéria seca do caule ($r = 99^{**}$), das folhas ($r = 97^{**}$) e da planta inteira ($r = 98^{**}$). Além disso, o acúmulo de matéria seca da planta inteira recebeu contribuição de outras variáveis vegetativas, pois houve correlação com o diâmetro do caule (Figura 12B) ($r = 0,94^{**}$) e com o comprimento de raiz (Figura 12C) ($r = 0,72^{**}$), ao longo do desenvolvimento das mudas.

A maior TCR da raiz ocorreu no intervalo de 586 a 785 graus-dia, correspondendo a 0,078 mg por g por graus-dia (Tabela 14). Entretanto, os valores máximos da TCR para o caule e as folhas foram verificados no intervalo de 786 a 980 graus-dia, com 0,153 e 0,102 mg por grama por graus-dia, respectivamente, contribuindo para que a maior taxa de acúmulo de matéria seca da planta inteira, 0,330 mg por g por graus-dia também ocorresse nesse intervalo.

Tabela 14. Taxa de crescimento relativo (TCR) da raiz, do caule, das folhas e da planta inteira de mudas de maracujazeiro, cultivadas em substrato, com o uso de solução nutritiva, em função do acúmulo de graus-dia.

Período	Raiz	Caule	Folha	Planta inteira
Graus-dia	-----mg por g por graus-dia-----			
0 - 175	0,069	0,040	0,059	0,168
176 - 330	0,043	0,051	0,074	0,169
331 - 585	0,072	0,094	0,085	0,251
586 - 785	0,078	0,060	0,048	0,194
786 - 980	0,075	0,153	0,102	0,330
981 - 1175	0,021	0,033	0,022	0,076

De modo geral, a TCR, nos respectivos órgãos, acompanhou o acúmulo de nutrientes (Figuras 10 e 11) e da massa da matéria seca (Figura 10D) e o índice TALON (Tabelas 11 e 12), dos respectivos órgãos das plantas, tendo o intervalo de 786 a 980 graus-dia, correspondente aos maiores valores para esses índices.

Verificou-se, de forma geral, diminuição da TCR de todos os órgãos das mudas de maracujazeiro, no período de 981 a 1.175 graus-dia, atingindo valores de

0,021; 0,033; 0,022 e 0,076 mg por g por grau dia na raiz, no caule, nas folhas e na planta inteira, respectivamente (Tabela 14). Esse decréscimo deve-se ao menor incremento da matéria seca das plantas (Figura 12D) e dos índices nutricionais TALON e TARN neste mesmo período (Tabelas 11 e 12), fatos estritamente ligados à estabilidade dos acúmulos de nutrientes e silício na fase final de avaliação das mudas (Figuras 10 e 11). Soma-se a isso o aumento da atividade respiratória e autossombreamento das folhas mais velhas, cuja importância aumenta com o avanço do ciclo fenológico da planta (FEY et al., 2009).

É importante ressaltar a observação de índices positivos para a TALON e para a TARN, bem como para a TCR, em todos os órgãos das mudas de maracujazeiro, indicando que as plantas apresentaram pleno desenvolvimento vegetativo ao longo do período de cultivo, com constante absorção de nutrientes, sobretudo entre o período de 786 a 980 graus-dia, conforme já discutido. Soma-se a isso as condições de cultivo a que as mudas foram submetidas, bem como o fornecimento equilibrado da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) utilizada, favorecendo o desenvolvimento contínuo das plantas, podendo ser indicada como adequada para o cultivo de mudas de maracujazeiro.

5. CONCLUSÕES

Para a formação de mudas de maracujazeiro, a solução nutritiva deve ter 13 mmol L⁻¹ de N, com 40% deste nutriente na forma de amônio. Portanto, infere-se que o maracujazeiro é uma planta tolerante ao amônio; no entanto, concentração crítica acima de 5,7 mmol L⁻¹ de NH₄⁺ na solução nutritiva diminui a absorção de cátions, a eficiência de utilização do nitrogênio e a produção de matéria seca.

O fornecimento de Si em mudas de maracujazeiro sob excesso de amônio incrementa o acúmulo, a eficiência de uso do N, o comprimento e a matéria seca da raiz e o índice de cor verde das folhas, e diminui o índice de vazamento de eletrólitos das folhas, refletindo no aumento do diâmetro do caule. Portanto, pode-se inferir que o Si favorece a mitigação da toxicidade de amônio em maracujazeiro durante a fase de produção de mudas.

As maiores taxas de crescimento resultam em maiores acúmulos de nutrientes e de Si e no maior acúmulo organogênico destes elementos em mudas de maracujazeiro, atingindo o máximo no período de 786 a 980 graus-dia. Na fase inicial de crescimento, até 175 graus-dia, há alta taxa de acúmulo de N, K, Mg, Fe e Cu, indicando a importância desses elementos para a produção de mudas.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. V.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; BARBOSA, J. C. Adubação nitrogenada e potássica no desenvolvimento de mudas de maracujazeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1138-1142, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000400015>>.
- ARIZ, I.; ARTOLA, E.; ASENSIO, A. C.; CRUCHAGA, S.; APARICIO-TEJO, P. M.; MORAN, J. F. High irradiance increases NH_4^+ tolerance in *Pisum sativum*: higher carbon and energy availability improve ion balance but not N assimilation. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 168, n. 10, p. 1009-1015, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2010.11.022>>.
- ARIZ, I.; ESTEBAN, R.; GARCÍA-PLAZAOLA, J. I.; BECERRIL, J. M.; APARICIO-TEJO, P. M.; MORAN, J. F. High irradiance induces photoprotective mechanisms and a positive effect on NH_4^+ stress in *Pisum sativum* L. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 167, n. 13, p. 1038-1045, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2010.02.014>>.
- BALKOS, K. D.; BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. Optimization of ammonium acquisition and metabolism by potassium in rice (*Oryza sativa* L. cv. IR-72). **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 33, p. 23-34, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02046.x>>.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **AgroEstat versão 1.0** - sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).
- BITTSÁNSZKY, A.; PILINSZK, K.; GYULAI, G.; KOMIVES, T. Over coming ammonium toxicity. **Plant Science**, Limerick, v. 231, n. 4, p.184-190, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.12.005>>.
- BORGOGNONE, D.; COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; REA, E.; SCHWARZ, D. Effect of nitrogen form and nutrient solution pH on growth and mineral composition of self-grafted and grafted tomatoes. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 61-69, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.012>>.
- BRITTO, D. T.; BALKOS, K. D.; BECKER, A.; COSKUN, D.; HUYNH, W. Q.; KRONZUCKER, H. J. Potassium and nitrogen poisoning: Physiological changes and biomass gains in rice and barley. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 94, p.1085-1089, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4141/CJPS2013-143>>.

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 159, n. 6, p. 567–584, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1078/0176-1617-0774>>.

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. Nitrogen acquisition, PEP carboxylase, and cellular pH homeostasis: new viewson old paradigms. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 28, n. 11, p. 1396-1409, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01372.x>>.

BYBORDI, A. Influence of $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratios and silicon on growth, nitrate reductase activity and fatty acid composition of canola under saline conditions. **African Journal of Agricultural Research**, Nairóbi, v. 5, n. 15, p. 1984-1992, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5897/AJAR09.064>>.

CAMPOS, C. N. S. **Silício e excesso de amônio e de nitrato em plantas de cana-de-açúcar e de pepino**. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

CAVALCANTE, Í. H. L.; SILVA JUNIOR, G.B.; SANTOS, E. M.; LIMA, A. M. N. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf nitrogen concentration in papaya (pawpaw). **Philippine Journal of Crop Science**, 2015. In press.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, J. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biology Trace Element Research**, New York, v. 142, n. 1, p. 67-76, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12011-010-8742-x>>.

CHOI, J. M.; LATIGUI, H.; LEE, C. W. Growth and nutrient up take responses of ‘Seolhyang’ strawberry to various ratios of ammonium to nitrate nitrogen in nutrient solution culture using inert media. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 10, n. 59, p. 12567-12574, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5897/AJB11.1104>>.

CRUZ, C.; BIO, A. F. M.; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A. How does glutamine synthetase activity determine plant tolerance to ammonium? **Planta**, Heidelberg, v. 223, n. 5, p. 1068–1080, 2006.

CRUZ, C.; DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; BIO, A.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Intra-specific variation in pea responses to ammonium nutrition leads to different degrees of tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 70, n. 2-3, p. 233-243. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.09.014>>

CRUZ, J. L.; ALVES, A. A. C.; LECAIN, D. R.; ELLIS, D. D.; MORGAN, J. A. Effect of elevated CO_2 concentration and nitrate: ammonium ratios on gas exchange and growth of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Plant and Soil**, v. 374, n. 1-2, p. 33-43, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1869-8>>.

DETMANN, K.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, S. C. V.; SANGULARD, L. M. V. P.; REIS, J. V.; DETMANN, E.; RODRIGUES, F. A.; NUNES-NESI, A.; FERNIE, A. R.; DAMATTA, F. M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, v. 196, p.752-762, 2012.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, New York, v. 135, p. 1-9, 1998. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)>.

DOMÍNGUEZ-VALDIVIA, M. D.; APARICIO-TEJO, P. M.; LAMSFUS, C.; CRUZ, C.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; MORAN, J. F. Nitrogen nutrition and antioxidant metabolism in ammonium-tolerant and sensitive plants. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 132, n. 3, p. 359-369, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01022.x>>.

DOU, H.; ALVA, A. K.; BONDADA, B. R. Growth and chloroplast ultra structure of two citrus roots tock seedlings in response to ammonium and nitrate nutrition. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 11, p. 1731-1744, 1999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904169909365750>>.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, Wellesbourne, v. 155, p. 155-160, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 88, p. 97-185, 2005. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)>.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 123, n. 4, p. 521-530, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>>.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>>.

GAIAD, S.; RAKOCEVIC, M.; REISSMANN, C. B. N sources affect growth, nutrient content, and net photosynthesis in mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 49, n. 5, p. 689-697, 2006.

GUIMARÃES, M. M. C.; CAIRO, P. A. R.; NEVES, O. S. C. Crescimento de *Eucalyptus urophylla* em meio hidropônico com diferentes proporções de nitrato e amônio. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 52-61, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2014.011>>.

HAUCK, M. Ammonium and nitrate tolerance in lichens. **Environmental Pollution**, Barking, v. 158, n. 5, p. 1127–1133, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.036>>.

HELALI, S. M.; NEBLI, H.; KADDOUR, M.; MAHMOUDI, H.; LACHAËL, M.; OUERGHI, A. Influence of nitrate-ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 336, n. 1-2, p. 65-74, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0445-8>>.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micro nutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, Berlin, v. 240, n. 3, p. 447-458, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>>.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants with out soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. p. 347.

HORCHANI, F.; HAJRI, R.; ASCHI-SMITI, S. Is the sensitivity to ammonium nutrition related to nitrogen accumulation? **Current Botany**, Vidyanagar, v. 2, n. 1, p. 18-22, 2011.

HU, L.; YU, J.; LIAO, W.; ZHANG, G.; XIE, J.; LV, J.; XIAO, X.; YANG, B.; ZHOU, R.; BU, R. Moderate ammonium: nitrate alleviates low light intensity stress in mini Chinese cabbage seedling by regulating root architecture and photosynthesis. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 186, p. 143-153, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.020>>.

HUANG, L.; LU, Y.; GAO, X.; DU, G.; MA, X.; LIU, M.; GUO, J.; CHEN, Y. Ammonium-induced oxidative stress on plant growth and antioxidative response of duckweed (*Lemna minor* L.) **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 58, p. 355-362, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.031>>.

ISHIKAWA, S.; ANDO, S.; SAKAIGAICHI, T.; TERAJIMA, Y.; MATSUOKA, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 55, n. 4, p. 485-495, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00381.x>>.

JAMPEETONG, A.; BRIX, H.; KANTAWANICHKUL, S. Effects of inorganic nitrogen forms on growth, morphology, nitrogen uptake capacity and nutrient allocation of four tropical aquatic macrophytes (*Salvinia cucullata*, *Ipomoea aquatica*, *Cyperus involucratus* and *Vetiveria zizanioides*). **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 97, n. 1, p. 10-16, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.10.004>>.

KEEPING, M. G.; RUTHERFORD, R. S.; SEWPERSAD, C.; MILES, N. Provision of nitrogen as ammonium rather than nitrate increases silicon uptake in sugarcane. **AoBPlants**, Oxford, v. 7, 2015. (in press).

KOCHANOVÁ, Z.; JAŠKOVÁ, K.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biologia**, v. 69, n.

9, p. 1164-1171, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2478/s11756-014-0411-7>>.

KONISHI, N.; ISHIYAMA, K.; MATSUOKA, K.; MURU, I.; HAYAKAWA, T.; YAMAYA, T.; KOJIMA, S. NADH-dependent glutamate synthase plays a crucial role in assimilating ammonium in the Arabidopsis root. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 152, n. 1, p. 138-151, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/ppl.12177>>.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>>.

KURDALI, F.; AL-CHAMMAA, M.; MOUASESS, A. Growth and nitrogen fixation in silicon and/or potassium fed chick peas grown under drought and well watered conditions. **Journal of Stress Physiology and Biochemistry**, Irkutsk, v. 9, n. 3, p. 385-406, 2013.

LANQUAR, V.; LOQUE, D.; HORMANN, F.; YUAN, L. X.; BOHNER, A.; ENGELSBERGER, W. R.; LALONDE, S.; SCHULZE, W. X.; VON, WIREN, N.; FROMMER, W. B. Feedback inhibition of ammonium uptake by a phospho-dependent allosteric mechanism in Arabidopsis. **The Plant Cell**, Rockville, v. 21, n. 11, p. 3610-3622, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.109.068593>>.

LASA, B.; FRECHILLA, S.; LAMSFUS, C.; APARICIO-TEJO, P. M. The sensitivity to ammonium nutrition is related to nitrogen accumulation. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 143-152, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00239-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00239-4)>.

LENZA, J. B.; VALENTE, J. P.; RONCATTO, G.; ABREU, J. A. Desenvolvimento de mudas de maracujazeiro propagadas por enxertia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 1135-1140, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452009000400030>>.

LI, B.; LI, G.; KRONZUCKER, H. J.; BALUSKA, F.; SHI, W. Ammonium stress in Arabidopsis: signaling, genetic loci, and physiological targets. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 19, n. 2, p. 107-114, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.004>>.

LI, G.; LI, B.; DONG, G.; FENG, X.; KRONZUCKER H. J.; SHI, W. Ammonium-induced shoot ethylene production is associated with the inhibition of lateral root formation in Arabidopsis. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 64, n. 5, p. 1413-1425, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ert019>>.

LI, Q.; LI, B.; KRONZUCKER, H. J.; SHI, W. Root growth inhibition by NH_4^+ in Arabidopsis is mediated by the root tip and is linked to NH_4^+ efflux and GMPase activity. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 33, n. 9, p. 1529-1542, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02162.x>>.

LI, S.; WANG, Z.; STEWART, B. A. Responses of crop plants to ammonium and nitrate. In: SPARKS, D. L. **Advances in Agronomy**. Newark: Elsevier, 2013. cap. 118, p. 205-397.

LI, W.; BI, Y.; GE, Y.; LI, Y.; WANG, J.; WANG, Y. Effects of postharvest sodium silicate treatment on pinkroot disease and oxidative stress-antioxidative system in musk melon fruit. **European Food Research and Technology**, Berlin, v.234, n. 1, p. 137-145, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00217-011-1611-9>>.

LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 209, n. 2, p. 217-224, 1999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1004526604913>>.

LIU, Y.; LAI, N.; GAO, K.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Ammonium inhibits primary root growth by reducing the length of meristem and elongation zone and decreasing elemental expansion rate in the root apex in *Arabidopsis thaliana*. **PlosOne**, v. 8, n. 4, p. e-61031, 2013.

MACIEL, N.; BATUTISTA, D.; AULAR, J. Crescimento desarrollo y arquitectura de *Passiflora edulis* f. *flavicarpa*. **Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticultural**, San Jose, n. 38, p. 133-138, 1994.

MAKSIMOVIC, J. D.; BOGDANOVIC, J.; MAKSIMOVIC, V.; NIKOLIC, M. Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 170, n. 6, p. 739-744, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200700101>>.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 4, p. 380-388, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/rca2013.057>>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2012. 643 p.

MENDONÇA, V.; FERREIRA, E. A.; PAULA, I. C. M.; BATISTA, T. M. V.; RAMOS, J. D. Crescimento de mudas de maracujazeiro-amarelo influenciado por doses de nitrogênio e de superfosfato simples. **Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 137-143, 2007a.

MENDONÇA, V.; TOSTA, M. S.; MACHADO, J. R.; GOULART JÚNIOR, S. A. R.; TOSTA, J. S.; BISCARO, G. A. Fertilizante de liberação lenta na formação de mudas

de maracujazeiro 'amarelo'. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 344-348, 2007b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000200012>>.

MENDOZA-VILLARREAL, R.; VALDEZ-AGUILAR, L. A.; SANDOVAL-RANGEL, A.; ROBLEDO-TORRES, V.; BENAVIDES-MENDOZA, A. Tolerance of lisianthus to high ammonium levels in rockwool culture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 38, n. 1, p. 73-82, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2014.920379>>.

NATALE, W.; PRADO R. M.; ALMEIDA, E. V.; BARBOSA, J. C. Adubação nitrogenada e potássica no estado nutricional de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Acta Scientiarum: agronomy**, Maringá, v. 28, n. 2, p. 187-192, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v28i2.1036>>.

NEVES, C. S. V. J.; CARVALHO, S. K. C.; NEVES, P. M. O. J. Porcentagem de frutificação, período de desenvolvimento dos frutos e unidades térmicas para maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 21, n. 2, p. 128-130, 1999.

PETRICKA, J. J.; WINTER, C. M.; ANNU, P. N. B. Control of *Arabidopsis* root development. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 63, p. 563-590, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105501>>.

PRADO, R. M. Nitrogênio. In: _____. **Nutrição de plantas**. Jaboticabal: Editora UNESP, 2008. cap. 4, p. 83-120.

PRADO, R. M.; BRAGHIROLI, L. F.; NATALE, W.; CORRÊA, M. C. M.; ALMEIDA, E. V. Aplicação de potássio no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 295-299, 2004.

ROMERO, A.; MUNÉVAR, F.; CAYÓN, G. Silicon and plant diseases. a review. **Agronomía Colombiana**, Bogotá, v. 29, p. 473-480, 2011.

ROOSTA, H. R.; SAJJADINIA, A.; RAHIMI, A.; SCHJOERRING, J. K. Responses of cucumber plant to NH_4^+ and NO_3^- nutrition: the relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 121, n. 4, p. 397-403, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2009.03.004>>.

ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Effects of nitrate and potassium on ammonium toxicity in cucumber plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 7, p. 1270-1283, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904160802135050>>.

ROZANE, R. D.; PRADO, R. M.; NATALE, W.; ROMUALDO, L. M.; FRANCO, C. F. Caracterização biométrica e acúmulo de nutrientes em porta-enxertos de caramboleira cultivada em solução nutritiva. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 426-436, 2013.

RUZICKA, D. R.; BARRIOS-MASIAS, F. H.; HAUSMANN, N. T.; JACKSON, L. E.; SCHACHTMAN, D. P. Tomato root transcriptome response to a nitrogen-enriched soil patch. **BMC Plant Biology**, London, v. 10, n. 75, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/1471-2229-10-75>>.

SANTOS, P. C.; LOPES, L. C.; FREITAS, S. J.; SOUSA, L. B.; CARVALHO, A. J. C. Crescimento inicial e teor nutricional do maracujazeiro amarelo submetido à adubação com diferentes fontes nitrogenadas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, n. esp. 1, p. 722-728, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000500101>>.

SÃO JOSÉ, A. R. **Maracujá: produção e mercado**. Vitória da Conquista: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 1994. 255 p.

SARASKETA, A.; GONZÁLEZ-MORO, M. B.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; MARINO, D. Exploring ammonium tolerance in a large panel of *Arabidopsis thaliana* natural accessions. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 65, n. 20, p. 6023-6033, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/jxb/eru342>>.

SETIEN, I.; VEGA-MAS, I.; CELESTINO, N.; CALLEJA-CERVANTES, M. E.; GONZALEZ-MURUA, C.; ESTAVILLO, J. M.; GONZALEZ-MORO, M. B. Root phosphoenolpyruvate carboxylase and NAD-malic enzymes activity increase the ammonium-assimilating capacity in tomato. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 171, p. 49-63, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2013.10.021>>.

SILVA, P. C. C.; COUTO, J. L.; SANTOS, A. R. Absorção dos íons amônio e nitrato e seus efeitos no desenvolvimento do girassol em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.10, n. 2, p. 97-104, 2010.

SIMONS, M.; SAHA, R.; GUILLARD, L.; CLÉMENT, G.; ARMENGAUD, P.; CAÑAS, R.; MARANAS, C. D.; LEA, P. J.; HIREL, B. Nitrogen-use efficiency in maize (*Zea mays* L.): from 'omics' studies to metabolic modelling. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 65, p. 657-667, 2014.

SU, S.; ZHOU, Y.; QIN, J.G.; WANG, W.; YAO, W.; SONG, L. Physiological responses of *Egeria densa* to high ammonium concentration and nitrogen deficiency. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 86, n. 5, p. 538-545, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.036>>.

VACULÍKOVÁ, M.; VACULÍK, M.; SIMKOVÁ, L.; FIALOVÁ, I.; KOCHANOVÁ, Z.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Influence of silicon on maize roots exposed to antimony and growth and antioxidant response. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux, v. 83, p. 279-284, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.014>>.

VILLA, F.; PASQUAL, M.; PIO, L. A. S.; RÁGUAS, C. B.; REZENDE, J. C. Utilização de nitrato de amônio e de ureia como fontes de nitrogênio na micropropagação de amoreira-preta. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 5, p. 365-370, 2009.

WANG, C.; SONG, H. Z.; PEI F. W.; WEI, L.; JIE, L. Effects of ammonium on the anti oxidative response in *Hydrilla Verticillata*, L) royle plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Maryland Heights, v. 73, n. 2, p. 189-195, 2010.

WELBANK, P. J. The effects of competition with *Agropyron repens* and of nitrogen and water supply on the nitrogen content of *impatiens parviflora*. **Annals of Botany**, London, v. 26, n. 3, p. 359-373, 1962.

WONG, M. Visual symptoms of plant nutrient deficiencies in nursery and landscape plants. **Soil and Crop Management**, Quebec, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2005.

WU, J. W.; SHI, Y.; ZHU, Y. X.; WANG, Y. C.; GONG, H. J. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. **Pedosphere**, Beijing, v. 23, p. 815-825, 2013.

XU, G. H.; FAN, X. R.; MILLER, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 63, p. 153-182, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>>.

YANG, H.; YANG, J.; LV, Y.; HE, J. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 17, n. 1 p. 81-92, 2014.

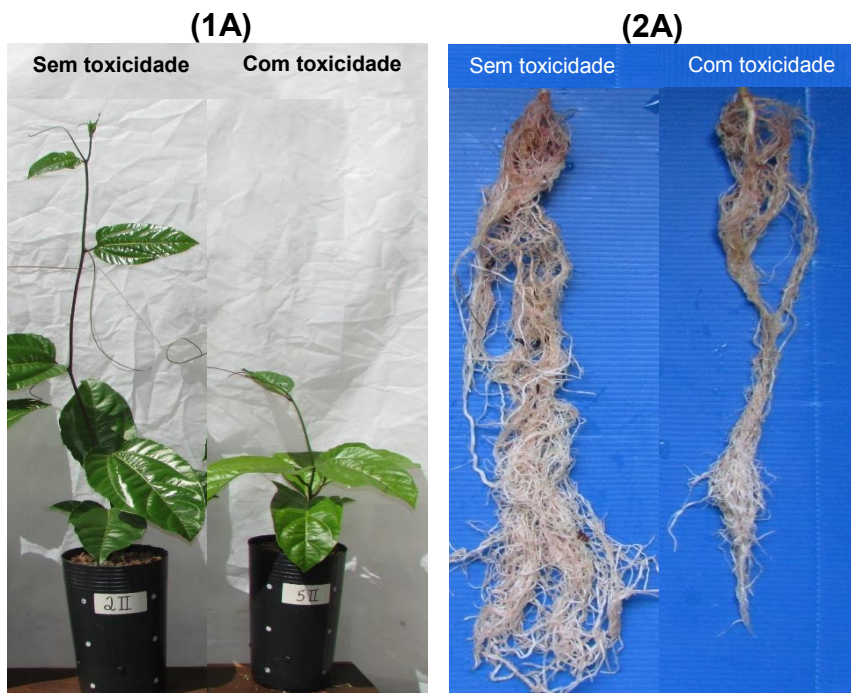
ZANIN, R. L.; ZAMBONI, A.; MONTE, R. TOMASI, N. VARANINI, Z.; CESCO, S.; PINTON, R. Transcriptomic analysis highlights reciprocal interactions of urea and nitrate for nitrogen acquisition by maize. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 56, n. 3, p. 532-548, 2015.

ZEBARTH, B.; TAI, H.; LUO, S.; MILLARD, P.; KOEYER, D.; LI, X.; XIONG, X. Effect of nitrogen form on gene expression in leaf tissue of greenhouse grown potatoes during three stages of growth. **American Journal of Potato Research**, New York, v. 89, n. 4, p. 315-327, 2012.

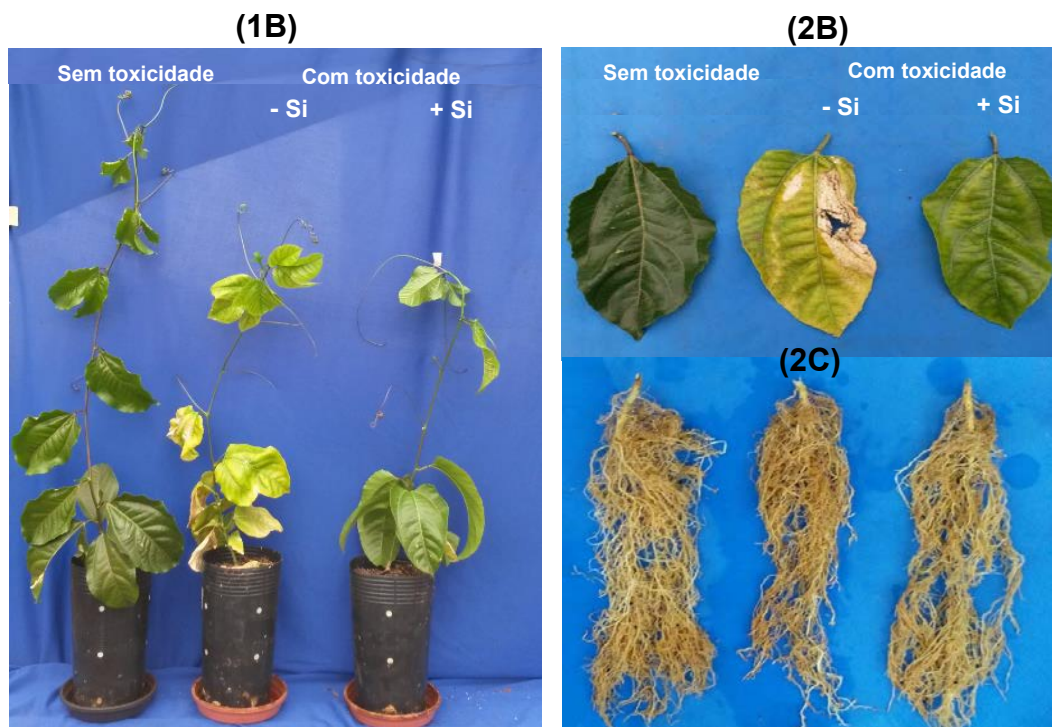
ZENG, H.; LIU, G.; KINOSHITA, T.; ZHANG, R.; ZHU, Y.; SHEN, Q.; XU, G. Stimulation of phosphorus uptake by ammonium nutrition involves plasma membrane H⁺ ATPase in rice roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 357, n. 1-2, p. 205-221, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1136-4>>.

ZHU, Y. X.; GONG, H. J. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 34, p. 455-472, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>>.

APÊNDICES



Apêndice A. Foto ilustrando a toxicidade de amônio na parte aérea (1A) e na raiz (2A) de mudas de maracujazeiro.



Apêndice B. Foto ilustrando o efeito do Si na mitigação da toxicidade de amônio na parte aérea (1B), nas folhas (2B) e na raiz (2C) de mudas de maracujazeiro.