**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Quelatos de ferro afetam o crescimento e a produção de rúcula
cultivada em sistema hidropônico**

Ricardo Toshiharu Matsuzaki

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

Ricardo Toshiharu Matsuzaki
Engenheiro Agrônomo

**Quelatos de ferro afetam o crescimento e a produção de rúcula cultivada em
sistema hidropônico**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Profa. Dra. **SIMONE DA COSTA MELLO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Matsuzaki, Ricardo Toshiharu
Quelatos de ferro afetam o crescimento e a produção de rúcula cultivada em sistema hidropônico/ Ricardo Toshiharu Matsuzaki.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
65 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. *Eruca sativa* 2. Quelatos de ferro 3. Hidroponia 4. Produção 5. Nutrientes
6. SPAD I. Título

CDD 635.5
M434q

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu filho Renato Teruichi Haneda Matsuzaki e a minha companheira Lais Akimi Ito Haneda pelos melhores momentos de minha vida e a realização de um sonho

À minha mãe Hiromi Matsuzaki e irmãos Marcos Katsuhiro Matsuzaki e Marcelo Akihisa Matsuzaki e aos demais familiares pelo apoio

À minha professora Simone da Costa Mello, pelos anos de ensinamentos, confiança e amizade.

Ao professor Keigo Minami, pelos conselhos, incentivos e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal Paulo Jaoude, Elisabete Sarkis São João, Maria Célia Rodrigues, Aparecido Donizete Serrano, Horst Bremer, Gérson Alexandre de Almeida, José Nivaldo dos Santos, José Galdêncio Stênico, David Ulrich e Éder de Araújo Cintra pela colaboração e conselhos.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia pela oportunidade e a secretária e amiga Luciane Lopes Toledo pelo suporte.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

Aos professores Godofredo César Vitti, Francisco Antonio Monteiro (e equipe da Nutrição Mineral de Plantas), Ricardo Alfredo Kluge, Paulo César Tavares de Melo, Sônia Maria De Stefano Piedade, Taciana Villela Savian, Ana Dionisio da Luz Coelho Novembre, Marcos Yassuo Kamogawa e Carlos Armenio Khatounian pelos ensinamentos.

Ao Gepol (Grupo de Estudos e Práticas em Olericultura) Rafael Campagnol (Muskito), Mateus Augusto Donegá, Sueyde Fernandes de Oliveira, Cleucione de Oliveira Pessoa, Leandro Eiji Hashimoto (Azuki), Guilherme Mikhail Helal Dorelli

(Arface), Bianca Ayumi Nakata (Faço-Nada), Alcides Rodrigues Gomes Júnior (Xernobil), Gabriel Kors (Liláis), Lucas Nijenhuis (Fór-Men), Rodrigo Freitas Batista (K-rent), Marina Sturion Bortolletto (Efeito), Camila Felli (D-vida), Lucas Muraoka (Ciguro-k-no), Lilian Heloisa da Silva (Ink-Ihada), Lucas Rodrigues (Bengala), Marina Sguilla (600), Breno Bicego Vieitez (Bic-xual), Deivid Lopes (Meliant), Fernando Silveira (Piraña) e ex-integrantes, pois tudo na vida são contatos.

Aos amigos da pós-graduação em especial à Márcia Eugênia Amaral de Carvalho, Cristiano Fleury de Azevedo, Eduardo Yuji Watanabe pelos bons momentos juntos.

À república Poko Loko, em especial àqueles com quem tive oportunidade de conviver todos esses anos.

Ao senhor Isaltino Bicudo Sampaio, proprietário da IBS, e a funcionária Joice pelo fornecimento das mudas.

À Alltech Crop Science pelo fornecimento dos insumos e financiamento do projeto, especialmente aos engenheiros agrônomos Leonardo Porpino Alves e Marcos Donizeti Revoredo pela atenção, acessória técnica, paciência e parceria.

À equipe de divisão da Biblioteca e Documentação pelo suporte e padronização da dissertação nas normas da ABNT.

E, por fim, mas não menos importantes a todos aqueles não listados aqui, mas que de alguma forma contribuíram e torceram pela minha realização.

“A planta sempre está certa, o que pode
estar errada é a interpretação humana”

José Peres Romero

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Quelatos de ferro.....	19
2.2 Micronutriente ferro	22
2.3 Sistema hidropônico	25
2.4 A Cultura da rúcula	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Sistema hidropônico	33
3.2 Delineamento experimental.....	34
3.3 Soluções nutritivas.....	34
3.4 Manejo da solução nutritiva.....	35
3.5 Qualidade da água.....	35
3.6 Produção e transplante de mudas	36
3.7 Características avaliadas	37
3.7.1 Crescimento e distribuição de massa fresca e seca na planta	37
3.7.2 Determinação do índice relativo de clorofila nas folhas de rúcula	37
3.7.3 Teores de nitrogênio e ferro das folhas de rúcula	39
3.8 Análise estatística	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Resultados.....	39
4.1.1 Aspecto geral das plantas	39
4.2 Primeiro experimento	39
4.2.1 Concentrações de Fe nas soluções nutritivas	39
4.2.2 Crescimento das plantas	40
4.2.3 Teores de N e Fe nas folhas e índice relativo de clorofila	44
4.3 Segundo experimento.....	45
4.3.1 Concentrações de Fe nas soluções nutritivas	45
4.3.2 Crescimento das plantas	45
4.3.3 Teores de N e Fe nas folhas e índice relativo de clorofila	50

5 DISCUSSÃO.....	51
6 CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	65

RESUMO

Quelatos de ferro afetam o crescimento e a produção de rúcula cultivada em sistema hidropônico

Foram conduzidos dois experimentos com o objetivo de avaliar a eficiência do uso de quelatos de ferro no cultivo hidropônico de rúcula em ambiente protegido. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com 4 repetições e 6 tratamentos: Fe-IDHA (ácido D,L aspártico, N-(1,2 dicarboxietil) tetra sódico), Fe-EDTA (ácido etilenodiamino tetra acetic), Fe-ORGÂNICO (a base de aminoácidos), Fe-EDDHA (ácido etilenodiamino – di (o – hidroxifenil-acético o-o 4,8%) e Fe-HBED (ácido N, n`-Bis (2-Hidroxibenzil) N- etilenodiamina n`dipropiônico) e testemunha (sem adição de ferro). O primeiro experimento foi conduzido no período de 8 de maio a 7 de junho de 2012 e o segundo entre 13 de junho e 13 de julho de 2012. As mudas de rúcula, da cultivar “Folha Larga”, foram transplantadas aos 10 DAS. As avaliações biométricas foram realizadas aos 10, 15, 20, 25 e 30 dias após o transplante (DAT) para: altura das plantas, número de folhas, área foliar, massa fresca e seca das folhas e massa seca das raízes. Aos 15, 20, 25 e 30 dias após o transplante (DAT) foram determinados o índice relativo de clorofila (IRC) e os teores de nitrogênio e ferro das folhas. Todos os quelatos possibilitaram fornecimento suficiente de ferro para o adequado crescimento e produtividade de rúcula em NFT. Plantas submetidas aos tratamentos Fe-HBED e Fe-EDDHA foram estatisticamente semelhantes ao quelato Fe-EDTA e Fe-ORGÂNICO, mas superiores ao Fe-IDHA e testemunha em relação ao crescimento.

Palavras-chave: *Eruca sativa* Miller; Quelatos de ferro; Hidroponia; Produção; Nutrientes; Índice relativo de clorofila

ABSTRACT

Iron chelates affect growth and yield arugula cultivated in hidroponic system

Two experiments were carried out to evaluate the efficiency of using iron chelates in hydroponic rocket salad in a greenhouse. The experimental design was completely randomized with 4 replications and six treatments: Fe-IDHA, Fe-EDTA, Fe-ORGÂNICO, Fe-EDDHA and Fe-HBED) and control. The first experiment was conducted from May 8 to June 7, 2012 and the second between 13 June and 13 July 2012. The seedlings of rocket salad variety Folha Larga were transplanted at 10 DAS. The biometric evaluations were performed at 10, 15, 20, 25 and 30 DAT, and analyzed to: plant height, number of leaves, leaf area, fresh and dry weight of leaves and dry weight of roots. At 15, 20, 25 and 30 days after transplanting (DAT) were determined relative chlorophyll index (RCI) and nitrogen and iron contents of the leaves. All chelates made it possible sufficient supply of iron for the adequate growth and productivity of rocket in NFT. Plants subjected to treatments Fe-HBED and Fe-EDDHA were statistically similar to chelate Fe-EDTA and Fe-ORGÂNICO, but higher than the Fe-IDHA and control in relation to growth.

Keywords: *Eruca sativa* Miller; Iron chelates; Hydroponics; Production; Nutrients; Relative chlorophyll index

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista Geral da estufa agrícola. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	32
Figura 2 - Umidade relativa mínima, média e máxima (%) do primeiro e segundo experimento (A e C) e temperatura mínima, média e máxima (°C) do primeiro e segundo experimento (B e D) durante os períodos de cultivos. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	32
Figura 3 - Conjunto eletrobomba (A); temporizador eletrônico (B); detalhes das bancadas (C e D). Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	33
Figura 4 - Mudas de rúcula aos 8 DAS (A) e no momento do plantio aos 10 DAS (B). Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	37
Figura 5 - Imagem ilustrativa demonstrando local onde foram realizadas as leituras com o medidor de clorofila.....	37
Figura 6 - Plantas com sintomas de deficiência de Fe (controle), caracterizados pela clorose internerval das folhas e porte reduzido (Figura 6a) e plantas nutridas com Fe (Figura 6b)	39
Figura 7 - Efeito dos quelatos de ferro na altura do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	41
Figura 8 - Efeito dos quelatos de ferro no número de folhas do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	42
Figura 9 - Efeito dos quelatos de ferro na área foliar do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	42
Figura 10 - Efeito dos quelatos de ferro na massa fresca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	43
Figura 11 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	43
Figura 12 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca das raízes do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	44

Figura 13 - Efeito dos quelatos de ferro na altura do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	47
Figura 14 - Efeito dos quelatos de ferro no número de folhas do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	48
Figura 15 - Efeito dos quelatos de ferro na área foliar do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	48
Figura 16 - Efeito dos quelatos de ferro na massa fresca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	49
Figura 17 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca da parte aérea do conjunto de plantas de plantas, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	49
Figura 18 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca das raízes do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidades de quelatos de ferro utilizados nas soluções nutritivas para o cultivo de rúcula em sistema hidropônico.	34
Tabela 2 - Quantidades de fertilizantes utilizados nas soluções nutritivas para o cultivo de rúcula em sistema hidropônico, adaptado de Furlani et al.(1999).35	
Tabela 3 - Características físico-químicas e químicas da água. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	36
Tabela 4 - Concentrações de ferro nas soluções nutritivas do primeiro experimento, no momento do descarte, aos 10, 20 e 30 DAT de rúcula. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	45
Tabela 5 - Valores de F da análise de variância para os teores foliares de N, Fe e índice relativo de clorofila (IRC) nas folhas de rúcula. Primeiro experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.....	45
Tabela 6 - Índice relativo de clorofila (IRC) das folhas de rúcula do primeiro experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	36
Tabela 7 - Concentrações de ferro nas soluções nutritivas do segundo experimento, no momento do descarte, aos 10, 20 e 30 DAT de rúcula. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	44
Tabela 8 - Valores de F da análise de variância para os teores foliares de N e Fe, e índice relativo de clorofila (IRC) para o segundo experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	51
Tabela 9 - Teores de ferro e índice relativo de clorofila (IRC) das folhas de rúcula do segundo experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012.	50

1 INTRODUÇÃO

A rúcula (*Eruca sativa* Miller) é uma das hortaliças mais populares, apreciada pelo seu sabor picante e folhas com odor característico, consumida principalmente como folhas cruas, em saladas, no acompanhamento de carnes em churrascarias, pizzas, petiscos e grande variedade de pratos. É considerada a hortaliça mais rica em ferro (CARVALHO, 1988) e em ômega 3 (ALVES FILHO, 2002) destacando-se também pelas suas propriedades terapêuticas, tais como digestiva, diurética, estimulante, laxativa e anti-inflamatória (REGHIN et al., 2005).

Embora a alface seja ainda a folhosa mais plantada e consumida no Brasil, nos últimos anos a rúcula vem conquistando espaço no mercado. Em função de suas qualidades, essa folhosa apresentou um crescimento de 333%, na comercialização no estado de São Paulo, entre os anos de 1997 a 2006 (PURQUERIO; TIVELLI, 2007).

Tradicionalmente essa cultura é cultivada em campo, no sistema de semeadura direta. Entretanto, a sua produção vem crescendo no sistema hidropônico, em estufas agrícolas, devido principalmente à melhor qualidade e maior valor agregado do produto, menor ciclo de cultivo e maior número de colheitas no ano. Nesse sistema, o sucesso da produção depende principalmente do manejo adequado da solução nutritiva, fator diretamente relacionado ao desenvolvimento e à qualidade das plantas (GUERRA et al., 2009; MARTINEZ, 1999).

Para compor as soluções nutritivas, os fertilizantes mais solúveis e estáveis são escolhidos para disponibilizar os nutrientes às plantas, dentre os quais estão os quelatos, usados como fontes de cálcio e de metais, especialmente de ferro, devido a sua instabilidade na solução nutritiva (LINDSAY, 1979).

Os íons férricos e seus complexos tem baixa estabilidade em sistemas aquáticos, mas eles são amplamente tamponados pelo uso de fertilizantes quelatizados (MOREL; HERING, 1993), o que aumenta a sua concentração em solução. Estes fertilizantes quelatizados, dependendo da sua composição, são capazes de manter os íons numa forma solúvel em ambientes onde o pH e a presença de substâncias, como fosfatos, carbonatos e agroquímicos, resultam na precipitação de nutrientes. No mercado existem inúmeros agentes complexantes envolvendo, principalmente, micronutrientes metálicos (Cu, Zn, Mn e Fe), porém, há

uma oferta maior de quelatos de ferro pelo fato desse micronutriente estar indisponível para as plantas se aplicado na forma de sais em soluções nutritivas.

Para o ferro, o EDTA (ácido etilenodiamino tetra acético) é um dos quelatos mais usados, em soluções nutritivas com pH até 7,0. Em pH mais elevado, outros produtos apresentam maior estabilidade como o EDDHA (ácido etilenodiamino – di(o – hidroxifenil-acético o-o 4,8%) e HBED (ácido N, n`-Bis (2-Hidroxibenzil) N-etilenodiamina n`dipropiônico). Entretanto, a maioria desses quelatos são produtos persistentes em solo e água, e tem havido uma preocupação crescente nos últimos anos sobre o risco ambiental de sua aplicação (HYVÖNEN et al., 2003). Dessa maneira, agentes quelatizantes biodegradáveis vem sendo desenvolvidos com o objetivo de reduzir a contaminação do ambiente pelo uso de quelatos sintéticos não degradáveis e pela maior eficiência de uso pelas plantas, como o IDHA (ácido D,L aspártico, N-(1,2 dicarboxi etil) tetra sódico) (MITSCHKER; MORITZ; NAWROCKI, 2004; LUCENA et al., 2008), e os quelatos de origem orgânica. Assim, este trabalho teve como objetivo estudar a eficiência de diferentes quelatos de ferro no cultivo da rúcula em sistema hidropônico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Quelatos de ferro

O primeiro relato de estudo com quelatos surgiu em 1893, quando o químico suíço Alfred Werner postulou estudos a respeito de uma nova estrutura molecular para descrever estas moléculas. O termo quelato, do grego *chele*, foi inicialmente aplicado, em 1920, por MORGAN e DREW, como definição da estrutura molecular postulada por Werner (1893), comparando a estrutura a uma pinça ou quelas da lagosta e de outros crustáceos (MORGAN; DREW, 1920).

A pesquisa sobre a interação entre plantas e quelatos começou efetivamente a partir da década de 1950, com o objetivo de reduzir as deficiências de nutrientes nas plantas, como o Fe, Mn, Cu e Zn (WENGER; TANDY; NOWACK, 2005).

Existem inúmeras definições sobre fertilizantes quelatados, que segundo Leeson e Summers (2001) é uma mistura de elementos minerais que são ligados a algum tipo de carreador, que pode ser um aminoácido ou um polissacarídeo com a capacidade de se ligar ao metal por ligações covalentes, através de grupamentos aminos ou oxigênio, formando assim uma estrutura cíclica. Já para Albano e Miller (1998), esse tal complexo metal-quelato é o resultado de uma forma especial de complexação, na qual o agente quelante, forma inúmeras ligações numa estrutura ao redor do íon metálico.

Por definição, os sinônimos, ligante ou agente quelatizante ou agente complexante é um íon ou molécula, com pelo menos um par de elétrons não usados em ligações químicas, ou seja, não compartilhado. Existem os ligantes monodentados, no qual uma molécula do ligante se liga apenas a um ponto do íon metálico, como NH_3 , CN^- , H_2O , entre outros. Esses ligantes são considerados fracos. Já os ligantes polidentados se ligam a vários pontos de coordenação do íon metálico, sendo as ligações mais fortes, como exemplo EDTA, IDHA, EDDHA, ORGÂNICO, HBED, entre outros. Os complexos formados por ligantes polidentados recebem o nome particular de quelatos.

A legislação brasileira de fertilizantes não define com exatidão a diferença entre fertilizantes quelatados e complexados e os agentes que irão fazer esse recobrimento (agente quelatante e agente complexante). Para muitos, os agentes complexantes irão quelatar fertilizantes fluídos e os agentes quelatantes irão quelatar os fertilizantes na forma de pó. Já para alguns autores os agentes

complexantes são aqueles de natureza orgânica e os agentes quelantes são de natureza inorgânica. Para o Dr. Marcos Kamogawa¹, professor do Departamento de Química da ESALQ/USP, não há diferença entre os termos utilizados, pois em todos os casos a reação química envolvida é a complexação, sendo que a diferença se encontra na reatividade, ou seja, na eficiência da complexação. Quimicamente os dois são quelatos, porque eles se ligam aos íons metálicos através de múltiplos locais (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010).

A vantagem no uso de fertilizantes quelatados se dá principalmente devido a esses agentes serem capazes de manter os íons numa forma solúvel em ambientes onde o elemento poderia ser precipitado, pelos hidróxidos, fosfatos, carbonatos e outros agentes químicos. Entretanto, a eficácia desses produtos, depende não só do tipo de agente quelatizante, mas também de outros fatores como: área superficial específica do solo ou meio, do pH e da habilidade da planta em absorver o nutriente do agente quelatizante (LUCENA; MANZANARES; GARATE, 1992).

Os fertilizantes quelatados são usados na agricultura para aumentar a disponibilidade de nutrientes, dentre eles o cálcio, cobre, ferro, manganês e zinco (ÁLVAREZ-FERNANDEZ; GARCIA-MARCO; LUCENA, 2005), e recentemente novos agentes quelatantes tem sido estudados e planejados.

Vários estudos têm apontado que a capacidade dos fertilizantes quelatados em fornecer nutrientes às plantas depende da capacidade dos compostos em mantê-los solúveis na solução, e da capacidade das plantas em assimilarem os nutrientes (GARCÍA-MINA; CANTERA; ZAMARREÑO, 2003). No mercado existem inúmeros agentes quelatantes envolvendo, principalmente, micronutrientes metálicos (Cu, Zn, Mn e Fe), sendo o EDTA o quelato mais conhecido e usado devido a sua habilidade de complexar metais (NORVELL, 1991; LOPES-RAYO; CORREAS; LUCENA, 2012). O ferro é o elemento mais comum utilizado em fertilizantes na forma de quelatos (ABADIA, 1995), principalmente devido a sua instabilidade no meio, pois a solubilidade do Fe muda 1000 vezes com cada unidade de variação do pH (LINDSAY, 1979).

Os agentes quelatantes sintéticos, todos ácidos carboxílicos poliaminados, estão disponíveis na forma de diferentes moléculas e isômeros (YUNTA et al., 2003), e permanecem inalterados, na ausência de outros íons competidores, na

¹ KAMOGAWA, M. 2013. Comunicação pessoal

faixa de pH de 1,5 a 7,0 para EDTA, de 1,5 a 7,0 para IDHA, de 3,5 a 10,0 para EDDHA, de 3,5 a 13,0 para HBED, entre outros.

Outra forma de descrever a estabilidade de tal quelato de metal-ligando, é através da constante de equilíbrio ($\log K_a$) (WILKINSON, 1987). Assim, quanto maior esse valor, mais estável é o quelato, sendo que o HBED é o mais estável, com constante de 42,25 (L'EPLATTENIER; MURASE; MARTELL, 1967), seguido pelo EDDHA com 37,66 (YUNTA et al., 2003). O EDTA, que é o mais usado no Brasil, apresenta o valor de 27,57 (LINDSAY, 1979), o IDHA possui valor de 15,2 (TANDY et al., 2004) e os quelatos orgânicos podem formar complexos de estabilidade variável entre 2 a 12 (GARCÍA-MINA; ANTOLÍN; SÁNCHEZ-DÍAZ, 2004). Embora a estabilidade do quelato seja um bom indicador da sua eficácia, isto não tem sido demonstrado para os quelatos orgânicos, devido ao grande número de reações com diferentes compostos. Um comparador teórico eficaz de estabelecer a estabilidade desses quelatos requer cálculos de especiação de Fe (relacionada com a força de ligação entre o metal e o agente quelatizante) para cada composto, em diferentes condições agronômicas. Embora esta tenha sido realizada com êxito, aos quelatos (YUNTA et al., 2003), no caso dos quelato orgânicos é quase impossível (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010)

HBED foi um dos primeiros agentes quelatizantes estudados (L'EPLATTENIER; MURASE; MARTELL, 1967), sendo ainda muito utilizados para propósitos médicos (YUNTA; LOPES-RAYO; LUCENA, 2012). Inicialmente foi projetado para o tratamento de doenças relacionadas com a sobrecarga de ferro, pois forma o quelato mais estável existente (MA; MOTOKAITIS; MARTELL, 1994). Entretanto a sua estrutura foi caracterizada recentemente para uso na agricultura (LOPES-RAYO; HERNÁNDEZ; LUCENA, 2009).

Em meios alcalinos, aplicações de sulfato de ferro e Fe-EDTA não são eficientes na correção de deficiência desse elemento e apresentam baixa solubilidade (MARTENS; WESTERMANN, 1991; NATT, 1992). Nesses casos o EDDHA é considerado como a melhor solução para resolver a deficiência de ferro nas plantas quando é aplicado diretamente ao solo ou em fertirrigação (CHANEY; BELL, 1987; MARTENS; WESTERMANN, 1991), sendo na atualidade um dos mais utilizados na agricultura (HERNÁNDEZ-APAOLAZA; LUCENA, 2011)

Os quelatos não são absorvidos pelas plantas. Na região da rizosfera o Fe^{3+} quelato sofre redução pela enzima Fe-redutase, dessa maneira o elemento Fe^{2+}

é absorvido e o agente quelatizante é “eliminado” ficando livre no meio, podendo complexar mais ferro. Para Lucena (2003), é o modelo hipotético do “efeito de ida e volta”, que é suportado, pois quando o agente quelante retorna ao meio, pode complexar micronutrientes num curto espaço de tempo (PÉREZ-SANZ; LUCENA, 1995).

Devido a sua estabilidade e a capacidade de quelatizar novamente micronutrientes quando liberados da absorção pelas plantas, muitos questionam o uso desses quelatos sintéticos. Mas, como demonstrado em experimento realizado por Albano e Miller (1995), no intervalo de 10 dias a quantidade de ferro solúvel, ou seja, Fe-quelato diminui em até 85% nas soluções nutritivas. O quelato EDTA, por não ser biodegradável, representa um risco ao ambiente (JAWORSKA; SCHOWANECK; EFEIJTEL, 1999), sendo que em alguns países Europeus e em alguns estados Americanos, o uso do EDTA é proibido (JONES; WILLIAMS, 2001). Como alternativa tem sido usado os quelatos IDHA e EDDS (ácido etileno diamina-N,N'-dissuccínico), que são considerados entre os sintéticos, os mais biodegradáveis (NOVACK; VANBRIESEN, 2005) sendo propostos para a utilização na agricultura (MITSCHKER; MORITZ; NAWROCKI, 2004; LUCENA; HERNÁNDEZ-APAOLAZA; LUCENA, 2010; LOPES-RAYO; CORREAS; LUCENA, 2012) mesmo apresentando baixa estabilidade e alta reatividade em diferentes meios de cultivo. Assim, o seu uso como fertilizante em hidroponia e fertirrigação deve ser analisado (VILLÉN; GARCÍA-ARSUAGA; LUCENA, 2007).

Os agentes complexantes de natureza orgânica também são uma boa opção para a quelação de fertilizantes. Dentre os orgânicos destaca-se a quelação de minerais com aminoácidos, pois são mais baratos que os quelatos de Fe, ambientalmente mais corretos (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010) e possuem elevada capacidade de complexação do Fe (LUCENA, 2009)

2.2 Micronutriente ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigênio, silício e alumínio, correspondendo cerca de 5% do total. Ocorre nos meteoritos e no interior do magma (KRAUSKOPF, 1972), no entanto, boa parte encontra-se indisponível para as plantas, formando complexos insolúveis na

presença de oxigênio e em condições de pH neutro ou alcalino (GUERINOT; YI, 1994).

Esse metal é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (BOYER; CLARK; LA ROCHE, 1988; ZANCAN et al., 2008). Tem um importante papel como componente de enzimas envolvidas na transferência de elétrons, como citocromos e ferro-proteínas não envolvidas na fotossíntese, fixação de nitrogênio e respiração (EVANS; SORGER, 1966) e enzimas envolvidas na síntese de clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2004). Está envolvido também em reações de redução - oxidação, juntamente com outros micronutrientes metálicos, tais como zinco, cobre, níquel e molibdênio. Estes podem sofrer reações de oxidação e redução reversíveis, e também desempenham funções importantes na transformação de energia e na transferência de elétrons. (TAIZ; ZEIGER, 2004). Já, para Malavolta (2006), o ferro é um elemento que participa das principais funções na planta, incluindo fotossíntese, respiração e balanço hormonal.

De maneira geral, o ferro é absorvido na forma bivalente (Fe^{2+}) pelas plantas que apresentam duas estratégias para aumentar a sua disponibilidade (ALCAÑIZ et al., 2004; MARSCHNER; ROHMELD, 1994). A primeira, presente em dicotiledôneas e monocotiledôneas não-gramíneas, incide na redução do Fe^{3+} em Fe^{2+} pelo incremento na liberação de H^+ . Esta redução é promovida por uma proteína específica, denominada ferro quelato redutase. Após essa redução, o Fe é transportado por transportadores específicos de membrana para o interior das células (HELL; STEPHAN, 2003). A segunda estratégia, desenvolvida por gramíneas, consiste na liberação de fitossideróforos, ligantes excretados pelas raízes, que se ligam ao Fe^{3+} , formando um complexo quelato (Fe^{3+} -fitossideróforos). Este complexo é transportado por transportadores específicos conhecidos como *Yellow Stripe* para dentro das células, facilitando a sua absorção (BRIAT; CURIE; GAYMARD, 2007).

Depois que o nutriente entra na epiderme da planta, através das raízes, por absorção ativa (MOORE, 1972), é transportado por transportadores até o xilema. Através do diferencial de potencial gerado pela transpiração, o Fe é carregado na seiva bruta e translocado até a parte superior das plantas. Dentro do xilema o ferro pode sofrer quelação por alguns ácidos orgânicos, principalmente o citrato (CATALDO et al., 1988). Já sua mobilidade para o floema é pouco conhecida, mas, sabe-se que o ferro contido na seiva é proveniente das folhas e é ligado por um

transportador, a nicotianamina (STEPHAN; SCHOLZ, 1993). Já o transporte intracelular é realizado por vários transportadores e genes (CURIE; BRIAT, 2003).

Dentro da planta, o ferro é considerado pouco móvel, pois é afetado por vários fatores, como a presença de Mn, deficiência de K, elevado teor de P, entre outros. Sua remobilização é intermediária em angiospermas, em função da inclusão do ferro em componentes estruturais nas grandes moléculas orgânicas e cloroplastos (MARSCHNER, 2012). A sua deficiência é uma desordem nutricional causada pelas baixas taxas de solubilidade ou pela baixa concentração de ferro na solução do solo ou nutritiva, fatores que diminuem a mobilidade do ferro requerida para o crescimento normal das plantas (PÉREZ-SANZ; LUCENA, 1995).

Os sintomas gerais de deficiência são caracterizados por zonas cloróticas internervais, supressão do crescimento do meristema apical (LARCHER, 1995), senescência de folhas (SPEROTTO; RICACHENEVSKY; FETT, 2007) e raízes (SPEROTTO et al., 2008). Eles ocorrem primeiro em folhas jovens, que apresentam clorose generalizada, no entanto, mantém nervuras verdes mais escuras, formando um reticulado fino (MATTOS JÚNIOR; BAAGLIA; QUAGGIO, 2005). Quando o sintoma é severo, podem apresentar coloração amarela-palha, com pouca ou nenhuma nervura verde, podendo até mostrar queimaduras nas margens ou na extremidade das folhas. Em plantas superiores, os ramos e galhos podem secar em situação de deficiência aguda (ROMHELD, 2001).

Ambientes alcalinos ou com elevadas concentrações de P, Mn ou Co podem induzir clorose por deficiência de ferro (ROMHELD, 2001).

Os sintomas de toxicidade de ferro diferem largamente com a idade da planta, estado de nutrição e com a cultivar utilizada (FOY; CHANEY; WHITE, 1978). Em linho, produz folhas com coloração verde escura, aliada à redução da parte aérea e raízes curtas e grossas (FOY; CHANEY; WHITE, 1978). Em arroz, ocorre o bronzeamento das folhas mais velhas, inicialmente, e deposição de pigmentos marrons, podendo levar ao retardo no crescimento, baixa produtividade, esterilidade das espiguetas, e em casos mais severos, morte da planta (PONNAMPERUMA; BRADFIELD; PEECH, 1955). Perdas totais na produção de arroz, devido ao excesso de ferro, já foram descritas na literatura (AUDEBERT; SAHRAWAT, 2000; WINSLOW et al., 1989).

Altas quantidades de ferro livre dentro das células são capazes de gerar radicais livres, como a hidroxila ($\text{OH}^\cdot$), através da reação de Fenton (BECANA;

MORAN; ITURBE-ORMAETXE, 1998). A hidroxila é extremamente tóxica para o metabolismo celular, pois é responsável pela oxidação de macromoléculas biológicas como lipídios de membrana, ácidos nucleicos e proteínas (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1984). Em experimento realizado com estacas de *Nicotiana plumbaginifolia*, uma espécie de fumo, cultivadas em sistema hidropônico, o excesso de ferro levou à queda de 40% na fotossíntese, 30% do conteúdo celular de ascorbato e glutiona (agentes antioxidantes), e aumento da atividade de ascorbato peroxidase (KAMPFENKEL; VAN MONTAGU; INZÉ, 1995).

Na saúde humana, o ferro é responsável pelo armazenamento e transporte de oxigênio, reações de liberação de energia de cadeia de transporte de elétrons, cofator de algumas reações enzimáticas e outras reações metabólicas essenciais (COOK; BAYNES; SKIKNE, 1992). Sua deficiência é a que mais prevalece em todo o mundo, ocasionando a anemia (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 1972).

2.3 Sistema hidropônico

Esse sistema de produção vem apresentando crescimento significativo no Brasil, sendo o sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) ou fluxo laminar de nutrientes a opção mais utilizada para a produção de hortaliças folhosas, (FURLANI et al., 1999). Basicamente consiste em fazer um fluxo laminar de solução nutritiva passar através do sistema radicular de forma intermitente com determinada frequência de turno de rega. O sistema é fechado, pelo qual a solução nutritiva é recuperada e reutilizada.

Furlani (1998) destaca alguns fatores ou partes do sistemas fundamentais para o cultivo de hortaliças no sistema NFT, como bancadas para a produção de mudas e cultivo, canais de cultivo apoiados nas bancadas, reservatório para solução nutritiva, um conjunto motobomba, um programador (timer), encanamentos e registros para distribuição e retorno da solução nutritiva. O canal pelo qual flui a solução deve ter uma inclinação de até 5%, para facilitar a circulação.

É um sistema que apresenta inúmeras vantagens onde se destacam o uso mais eficiente de água e fertilizantes, ausência de plantas invasoras e produção de hortaliças com menor contaminação microbiana e com melhor qualidade, já que as folhas não ficam diretamente em contato com o solo. As desvantagens do sistema são: elevado custo de implantação, dependência de energia elétrica, fácil

disseminação de patógenos, possibilidade de aquecimento da solução e déficit de oxigênio (FAQUIN; FURLANI, 1999; PIETRO MARTINEZ; SILVA FILHO, 2006).

O cultivo hidropônico deve ser realizado principalmente em ambiente protegido, para melhor aproveitar suas vantagens, pois dessa forma há maior controle do crescimento das plantas devido ao manejo da solução nutritiva, e às vantagens do cultivo sem solo, e também na necessidade de conhecimento sobre o manejo das condições climáticas no interior do ambiente (TEIXEIRA, 1996)

Conforme Teixeira (1996), ainda que a utilização de cultivos hidropônicos seja criticada em razão da grande extensão de área cultivável no país, essa é uma opção para o emprego em pequenas áreas e também onde o cultivo no solo não seria possível.

O sistema NFT suporta a produção de inúmeras espécies de hortaliças sendo que no Brasil as mais cultivadas são: alface, agrião, salsa, cebolinha, morango, manjerição, menta e rúcula. O cultivo dessa última espécie vem crescendo nesse sistema no país devido à elevada qualidade do produto, produção regular e maior conservação pós-colheita.

O cultivo hidropônico é um sistema que exige o manejo de vários fatores, como pH, nutrientes, condutividade elétrica, oxigênio e temperatura da solução nutritiva, limpeza do sistema de cultivo. Controle da temperatura, radiação solar e umidade relativa do ar no ambiente protegido, entre outros. (ADAMS, 1992; ADAMS, 1994).

2.4 A Cultura da Rúcula

A rúcula (*Eruca sativa* Miller) é um nome genérico para um número de espécies, é uma hortaliça folhosa, pertencente à família Brassicaceae, possui como centro de origem e de domesticação a região do mediterrâneo e oeste da Ásia. É uma planta anual, de porte baixo, possuindo normalmente altura de 15 a 20 cm (FILGUEIRA, 2003).

Sob o nome de rúcula é agrupado um grande número de espécies da família Brassicaceae que apresentam sabor picante, principalmente *Eruca sativa* Miller (SANTAMARIA et al., 1998), e, segundo Pignone (1997) existem três espécies que são utilizadas no consumo humano: *Eruca sativa* Miller, que possui ciclo de

crescimento anual, *Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC. e *Diplotaxis muralis* (L.) DC., ambas perenes.

Anatomicamente apresenta folhas relativamente espessas e divididas, o limbo foliar apresenta coloração verde e as nervuras verde-claras. Para Yamaguchi (1978), as folhas e as flores assemelham-se as do nabo e rabanete. No Brasil, de acordo com Minami e Tessarioli Neto (1998), a espécie mais cultivada é a *Eruca sativa* Miller, representada, principalmente, pelas cultivares “Cultivada” e “Folha Larga”. As cultivares mais usadas apresentam folhas relativamente espessas e divididas, de cor verde clara e as nervuras verde arroxeadas claras (TRANI; PASSOS, 1998). Vale ressaltar que as principais cultivares de rúcula apresentam diferenças quanto ao tipo de folha, que podem ter bordas lisas até bastante recortadas (MORALES; JANICK, 2002; SALA et al., 2004). As sementes são muito pequenas, possuindo em um grama cerca de 650 sementes (CAMARGO FILHO; MAZZEI, 2001) sendo muito usadas no Paquistão para extração de óleo, ricas em ácido erúgico, componente importante na indústria local (PADULOSI; PIGNONE, 1997).

Relata-se também o cultivo dessa espécie pelos antigos romanos, antes do nascimento de Cristo (YAMAGUCHI, 1978).

É uma das principais hortaliças folhosas produzidas no Brasil via hidroponia, por possuir ciclo curto, apresentar alto conteúdo nutricional, alta produção por área e ampla aceitabilidade pelo mercado consumidor, devido às suas diferenciadas características organolépticas (TRANI; PASSOS, 1998; REGHIN; OTTO; VINNE, 2004; AMORIM; HENZ; MATTOS, 2007). Considerada a mais rica em ferro, entre todas as hortaliças, contém ainda cálcio, fósforo, e vitaminas A e C (CARVALHO, 1988). Segundo Alves Filho (2002), essa cultura também é rica em ácido alfa-linolênico, mais conhecido como ômega-3, cuja deficiência na alimentação é considerada um fator de propensão às doenças coronarianas.

Além do seu uso na alimentação, destaca-se no cenário mundial como por ser considerada planta com muitas propriedades fitoterapêuticas, tais como: digestiva, diurética, estimulante, laxativa e anti-inflamatória (REGHIN et al., 2005).

Sua popularidade é alta nas regiões do país onde há forte presença de colonização italiana (TRANI; PASSOS, 1998). Por estar ligada aos italianos, o nome rúcula deriva-se da palavra italiana rucola ou rughetta (MORALES; JANICK, 2002).

Para Minami e Tessarioli Neto (1998), a melhor época de plantio, para as condições do estado de São Paulo, é de março a setembro, onde as temperaturas

médias são mais amenas. Já para regiões mais frias, o plantio pode ser feito o ano todo. Morales e Janick (2002) também afirmam que o crescimento dessa planta é favorecido em temperaturas amenas. Quando cultivadas sob altas temperaturas as plantas são estimuladas a antecipar a fase reprodutiva, emitindo o pendão floral prematuramente, tornando suas folhas fibrosas, sem qualidade para o consumo e mais picantes (FILGUEIRA, 2003).

De acordo com (CAMARGO, 1992; TRANI; FORNASIER; LISBÃO, 1992; SANTOS; ZATARIM; GOTTO, 2002), o ciclo de produção da rúcula é de 45-50 dias após a sementeira e a colheita. Para comercialização na forma de maços, as plantas devem possuir em torno 20 cm de altura, aceitando uma variação de 10% em torno dessa medida (TRANI et al., 1994). Já para Minami e Tessarioli Neto (1998), a colheita da rúcula é feita de 30 a 40 dias após a sementeira, quando suas folhas atingem 15 a 20 cm de comprimento, bem desenvolvidas, verdes e frescas. Isso mostra que o mercado é muito variável, sendo que cada região consumidora irá definir o tamanho ideal ou padrão das folhas para serem comercializadas.

Segundo Purquerio (2005), em cultivos comerciais a colheita é realizada de forma integral (folhas e raízes), sendo que também pode ser colhidas mais vezes, porém, dá-se a preferência à forma inteira, devido a sua perecibilidade e devido à queda de produção com cortes nas sucessivas rebrotas (TAKAOKA; MINAMI, 1984; PIGNONE, 1997).

Não há dados exatos sobre a produção nacional de rúcula, no entanto, trata-se de uma folhosa com crescente aumento no consumo nos últimos anos, com quantidade mensal de 16.029 dúzias de maços de 6 kg comercializados no CEAGESP, entre 1995 e 1999 (CAMARGO FILHO; MAZZEI, 2001). Em termos de aumentos em produção, Purquerio e Tivelli (2007) destacam que, entre 1997 a 2006, a quantidade comercializada no estado de São Paulo apresentou um crescimento de 333%. Já entre 1997 a 2003, houve um crescimento de 78% dessa hortaliça comercializada no Brasil (CAVARIANNI et al., 2008). No entanto, a produção atual não atende à elevada demanda dos grandes centros consumidores, fato este que está gerando uma expansão para várias partes do Brasil, principalmente na região Sudeste (PURQUEIRO; TIVELLI, 2007). O aumento na popularidade da rúcula é devido ao sabor picante de suas folhas, que são usadas em guarnição de saladas, principalmente no acompanhamento de carnes em churrascarias, pizzas, petiscos e grande variedade de pratos.

No Estado de São Paulo, as principais microrregiões produtoras são Paranapiacaba, Grande São Paulo, Sorocaba e Campinas, sendo que às duas primeiras são responsáveis por quase 90% da produção (TRANI; PASSOS, 1998). Na Companhia de Entrepostos e Armazéns de São Paulo (CEAGESP), a quantidade de rúcula comercializada no ano de 2011 foi de 1.884 toneladas, com uma média mensal de 157.072 kg (CEAGESP², 2013).

² COMPANHIA DE ENTREPOSTOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO **CEAGESP**. Seção de Economia. São Paulo-SP. Comunicação pessoal, 2013.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos em estufa agrícola do tipo arco, com 7 m de largura, 42 m de comprimento, com altura de 3,5 m, coberta com filme de polietileno aditivado (anti-UV) com espessura de 150 μm e com tela de sombreamento (50%) nas laterais (Figura 1), localizada na área experimental do Departamento de Produção Vegetal (Setor Horticultura) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz –ESALQ/USP, no município de Piracicaba (SP). A área do experimento está situada a 22° 42' 30" de latitude Sul, 47° 38' 00" de longitude Oeste e 546 m de altitude em relação ao nível do mar. Segundo a classificação proposta por Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco.

O primeiro experimento foi conduzido no período de 8 de maio a 7 de junho de 2012 e o segundo entre de 13 de junho a 13 de julho de 2012.

Foram registrados valores de umidade e temperatura, a cada 30 minutos, com o auxílio de uma estação meteorológica (SK SATO modelo SK-L200 THII), instalada no centro da estufa agrícola a 1,5m de altura, durante o período de condução dos experimentos. Durante o primeiro cultivo, as médias das temperaturas máximas, mínimas e médias foram, respectivamente, de 25,0, 14,3° e 19,6°C, respectivamente. Os valores de umidade relativa do ar máxima, mínima e média foram de 99,8, 55,6 e 84,1%, respectivamente. No segundo cultivo os valores médios máximo, mínimos e médios foram 24,5, 12,5 e 18,5°C, respectivamente, para temperatura e 99,8, 48,7 e 80,6%, respectivamente, para umidade relativa do ar (Figura 2).

Figura 1 - Vista Geral da estufa agrícola. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 2 – Umidade relativa mínima, média e máxima (%) do primeiro e segundo experimento (A e C) e de temperatura mínima, média e máxima (°C) do primeiro e segundo experimento (B e D) durante os períodos de cultivos. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

3.1 Sistema hidropônico

O sistema hidropônico utilizado foi o NFT (fluxo laminar de nutrientes), com recirculação da solução nutritiva. A estrutura foi composta por 6 bancadas, sendo que cada uma era composta por 8 perfis de polipropileno com 6 metros de comprimento, com 75 milímetros de largura, 45 milímetros de profundidade e espaçamento de 150 milímetros entre os orifícios. As bancadas eram alimentadas por reservatórios de 500 L, e a solução nutritiva era injetada por eletrobombas de 32 Watts. A declividade era de 5% a fim de permitir o retorno da solução. Os detalhes do sistema de cultivo encontram-se na Figura 3.

As eletrobombas eram controladas por um temporizador eletrônico programado para permanecer ligado por 15 minutos e desligado por 15 minutos, das 07:00 as 18:00 e por 15 minutos ligado as 20:30, 00:30 e 4:30 horas.

Figura 3 – Conjunto eletrobomba (A); temporizador eletrônico (B); detalhes das bancadas (C e D). Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

3.2 Delineamento experimental

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições e compostos pela testemunha e por cinco tipos de quelato de Fe aplicados nas soluções nutritivas: Fe-EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético), natureza sintética de moderada estabilidade, Fe-IDHA (ácido D,L aspártico, N-(1,2 dicarboxietil) tetra sódico), natureza sintética de moderada estabilidade, Fe-EDDHA (ácido etilenodiamino-di(o-hidroxifenil-acético orto-orto 4,8%)), natureza sintética de alta estabilidade , Fe-HBED (ácido N, n'-Bis(2-Hidroxibenzil) N-etilenodiamina n' dipropiônico), natureza sintética de alta estabilidade e Fe-ORGÂNICO (a base de aminoácidos) de natureza orgânica de moderada a baixa estabilidade.

3.3 Soluções nutritivas

As soluções nutritivas foram compostas pelos quelatos de ferro (Tabela 1), sendo que todas receberam, também, as mesmas quantidades de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e Mo aplicadas através dos fertilizantes descritos na Tabela 2.

Tabela 1 - Quantidades de quelatos de ferro utilizados nas soluções nutritivas para o cultivo de rúcula em sistema hidropônico

QUELATO	Concentração de Fe (%)	Quantidade g 1000 L ⁻¹
ORGÂNICO	15 Fe	24
IDHA	9 Fe	40
EDTA	13 Fe	27,7
HBED	9 Fe	40
EDDHA	6 Fe	60
Testemunha (sem ferro)	0 Fe	0

Tabela 2 - Quantidades de fertilizantes utilizados nas soluções nutritivas para o cultivo de rúcula em sistema hidropônico, adaptado de Furlani et al. (1999)

FERTILIZANTES	Concentração (%)	Quantidade g 1000 L ⁻¹
Nitrato de Cálcio	15 N; 20 Ca	1.200
Nitrato de Potássio	13 N; 44 K ₂ O	693
Sulfato de Magnésio	9,5 Mg; 12 S	265
MAP	12 N; 60 P ₂ O ₅	103
Cu-EDTA	15 Cu	3
Mn-EDTA	13 Mn	3,5
Zn-EDTA	15 Zn	1,3
Ácido bórico	17 B	2,6
Molibdato de sódio	39 Mo	0,2

Além dos fertilizantes, foi adicionado um produto comercial, chamado Compost Aid®, , na dosagem de 0,12g L⁻¹. É um aditivo resultante da mistura de enzimas e bactérias que auxilia no controle de patógenos nas soluções nutritivas.

3.4 Manejo da solução nutritiva

Os fertilizantes foram misturados nos reservatórios de 500 L para alimentar os canais de cultivo de plantas. Diariamente, entre 8 e 9 horas, foram realizadas leituras e correção do pH, para mantê-lo entre 5,5 e 6,5, através da adição de 1 mol L⁻¹ de ácido fosfórico ou 1 mol L⁻¹ de hidróxido de sódio e também a leitura da condutividade elétrica (CE) das soluções nutritivas.

A cada 10 dias, as soluções nutritivas foram trocadas com o objetivo de manter as concentrações iniciais dos micronutrientes ao longo do tempo, totalizando 2 trocas em cada experimento.

Foram coletadas amostras das soluções nutritivas logo após o preparo e no momento do descarte, que ocorreu aos 10, 20 e 30 DAT, para determinar as concentrações iniciais e finais do Fe solúvel.

3.5 Qualidade da água

Foi coletada uma amostra de água, para a determinação dos parâmetros: condutividade elétrica a 25°C, pH, concentrações (mg L⁻¹) de enxofre, cloro, sódio, cálcio, silício, magnésio, zinco, ferro, boro e manganês (Tabela 3).

Tabela 3 - Características físico-químicas e químicas da água. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Característica	Unidade	Valor
Condutividade Elétrica	dS m ⁻¹	0,22
pH	-	5,9
Enxofre	mg L ⁻¹	9,5
Cloro	mg L ⁻¹	35
Sódio	mg L ⁻¹	34,73
Cálcio	mg L ⁻¹	6,2
Silício	mg L ⁻¹	5,1
Magnésio	mg L ⁻¹	2,24
Zinco	mg L ⁻¹	0,12
Ferro	mg L ⁻¹	NT
Boro	mg L ⁻¹	NT
Manganês	mg L ⁻¹	NT

NT=Valores não detectáveis

Além das características físico-químicas e químicas da água, foi analisada as características biológicas, com o diagnóstico da presença de dois patógenos: *phythium* e *thielaviopsis*. Esses patógenos foram controlados com a adição do Compost Aid[®].

3.6 Produção e transplante de mudas

Foram utilizadas mudas de rúcula cultivar Folha Larga, produzidas em bandejas plásticas de 200 células, preenchidas com substrato à base de fibra de coco, no viveiro comercial (IBS) localizado no município de Piracicaba-SP. As mudas (Figura 4) foram transplantadas aos 10 dias após a semeadura (DAS), no dia 8 de maio (primeiro experimento) e 13 de junho de 2012 (segundo experimento). Cada conjunto de plantas era composta por aproximadamente 10 plantas de rúcula.

Durante o período de cultivo dos experimentos, não foi realizado o controle de pragas com a aplicação de produtos químicos, mas somente o uso de armadilhas adesivas, que foram colocadas próximas às bancadas de cultivo na estufa agrícola.

Figura 4 - Mudas de rúcula aos 8 DAS (A) e no momento do plantio aos 10 DAS (B). Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

3.7 Características avaliadas

3.7.1 Crescimento e distribuição de massa fresca e seca na planta

A cada 5 dias (10, 15, 20, 25 e 30 DAT), pela manhã (7:00 horas), foram amostradas dez conjuntos de plantas de cada parcela, com o objetivo de avaliar a altura (cm) das plantas (da base da inserção da raiz até a última folha), com o auxílio de uma régua milimetrada, número de folhas, área foliar (cm²), estimada através do medidor de área (LI-COR, Inc. Lincoln), massa fresca e seca da parte aérea (g) e massa seca das raízes(g).

3.7.2 Determinação do índice relativo de clorofila nas folhas de rúcula

Para determinação do índice relativo de clorofila foram realizadas duas leituras por folha (Figura 5), pela manhã (entre 8 às 10 horas), num total de 6 folhas por conjunto de plantas e 6 conjuntos de plantas por parcela aos 15, 20, 25 e 30 DAT, usando um medidor de clorofila na folha (Minolta SPAD 502). As folhas mais novas, totalmente expandidas, foram analisadas por mostrarem os sintomas de deficiência de Fe nas plantas testemunhas.

Figura 5 - Imagem ilustrativa demonstrando local onde foram realizadas as leituras com o medidor de clorofila

3.7.3 Teores de nitrogênio e ferro das folhas de rúcula

A massa seca da parte aérea do conjunto de plantas, após a secagem, foi moída para determinação dos teores de nitrogênio e ferro. A partir dos valores obtidos foram calculadas as quantidades de nutrientes extraídos.

3.8 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância com teste F e as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5 e 1% de probabilidade. Para o fator tempo, foram realizadas análises de regressão polinomial. O programa estatístico usado foi o SAS 9.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados

4.1.1 Aspecto geral das plantas

As plantas de rúcula que não receberam Fe via solução nutritiva apresentaram sintomas de deficiência caracterizados pela clorose nas folhas e crescimento lento. Nos demais tratamentos, a nutrição com esse micronutriente resultou em plantas sem sintomas de deficiência (Figura 6).

Figura 6 – Plantas com sintomas de deficiência de Fe (controle), caracterizados pela clorose internerval das folhas e porte reduzido (Figura 6a) e plantas nutridas com Fe (Figura 6b) aos 30 DAT.

4.2 Primeiro experimento

4.2.1 Concentrações de Fe nas soluções nutritivas

As maiores concentrações médias de Fe, determinadas nas soluções nutritivas após o uso delas por 10 dias para o fornecimento dos nutrientes às plantas, foram obtidas com as aplicações de Fe-EDTA, Fe-EDDHA e Fe-HBED (Tabela 4).

Tabela 4 - Concentrações de ferro nas soluções nutritivas do primeiro experimento, no momento do descarte, aos 10, 20 e 30 DAT de rúcula. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

TRATAMENTO	10	20	30
	DAT		
	mg L ⁻¹		
TESTEMUNHA	-	-	-
IDHA	0,4	0,66	0,07
EDTA	3,28	4,43	0,51
ORGÂNICO	0,08	0,19	0,09
EDDHA	4,39	5,51	0,58
HBED	3,64	4,76	0,53

4.2.2 Crescimento das plantas

A análise de variância acusou interação significativa entre os tratamentos e entre os períodos de cultivo para as variáveis a seguir: altura, número de folhas, área foliar, massa fresca e seca da parte aérea e massa seca das raízes.

Para os valores de altura de plantas que receberam Fe-EDDHA e não receberam esse micronutriente (Testemunha) foram ajustadas equações de regressão linear, sendo que para os demais tratamentos foram ajustadas equações de regressão quadrática. As plantas tratadas com os quelatos Fe-HBED, Fe-EDDHA, Fe-EDTA eram mais altas que aquelas tratadas com Fe-IDHA ou que não receberam esse elemento (testemunha), aos 15, 20 e 25 DAT. Aos 30 DAT, a altura das plantas do tratamento Fe- HBED foi maior em relação aos demais (Figura 7).

O número de folhas aumentou linearmente para todos os tratamentos aos longo do ciclo de cultivo. Entretanto, aos 20 DAT, o conjunto de plantas tratadas com Fe-HBED, Fe-EDDHA e Fe-ORGÂNICO tinham maior número de folhas em relação às plantas dos tratamentos Fe-IDHA e controle. Aos 25 e 30 DAT, todos os tratamentos foram superiores à testemunha para o número de folhas (Figura 8).

Houve aumento linear para a área foliar do conjunto de plantas testemunhas ao longo do ciclo de cultivo. Para os demais tratamentos, ajustaram-se equações de regressão quadrática, sendo que aos 20 e 25 DAT, as plantas crescidas com Fe-HBED tinham maior área foliar que as plantas dos tratamentos testemunha e Fe-IDHA. Aos 30 DAT, por sua vez, os tratamentos Fe-HBED, Fe-EDDHA e Fe-ORGÂNICO foram superiores à testemunha e ao tratamento Fe-IDHA (Figura 8).

A massa fresca da parte aérea do conjunto de plantas referentes ao tratamento testemunha aumentou linearmente ao longo do período de cultivo. Para os demais tratamentos foram ajustadas equações de regressão quadrática, sendo

que aos 20 e 25 DAT as plantas dos tratamentos Fe-HBED e Fe-EDDHA tinham massas frescas semelhantes entre si e superiores à testemunha. Aos 30 DAT, as plantas nutridas com Fe-HBED, Fe-EDDHA e Fe-EDTA eram semelhantes entre si quanto à massa fresca mas superiores às plantas dos tratamentos testemunha e Fe-IDHA (Figura 9). Resultados semelhantes foram obtidos para a massa seca da parte aérea, entretanto, aos 25 e 30 DAT, todos quelatos de Fe proporcionaram valores dessa característica semelhantes entre si, mas superiores à testemunha (Figura 10). Para a massa seca das raízes foram ajustadas equações de regressão linear ao longo do tempo, referentes aos tratamentos testemunha, Fe-IDHA, Fe-EDTA e Fe-HBED, e equações de regressão quadrática para os tratamentos Fe-ORGÂNICO e Fe-EDDHA. Houve aumento dessa variável ao longo do ciclo de cultivo para todos os tratamentos. Aos 25 DAT, as plantas que receberam FE-HBED tinham maior massa seca das raízes em relação à testemunha. Entretanto, aos 30 DAT, os tratamentos Fe-HBED, Fe-EDDHA e Fe-ORGÂNICO foram semelhantes entre si e resultaram em aumento da massa seca das raízes do conjunto de plantas em relação à testemunha (Figura 11).

Figura 7 - Efeito dos quelatos de ferro na altura do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 8 - Efeito dos quelatos de ferro no número de folhas do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 9 - Efeito dos quelatos de ferro na área foliar do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 10 - Efeito dos quelatos de ferro na massa fresca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 11 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 12 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca das raízes do conjunto de plantas de rúcula, do primeiro experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

4.2.3 Teores de N e Fe nas folhas e índice relativo de clorofila

A análise de variância não acusou efeito significativo entre os tratamentos ao longo do ciclo para as concentrações de N e Fe nas folhas de rúcula (Tabela 5). Entretanto, as plantas referentes ao tratamento controle apresentaram sintomas de deficiência de Fe. Para o índice relativo de clorofila, a análise de variância acusou efeito significativo entre os tratamentos.

Tabela 5 – Valores de F da análise de variância para os teores foliares de N, Fe e índice relativo de clorofila (IRC) nas folhas de rúcula. Primeiro experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Características Avaliadas	Teste F	C.V.(%)	D.M.S.	Média Geral
Nitrogênio	2,26 ^{NS}	10,12	1,13	10,76 g Kg ⁻¹
Ferro	2,92 ^{NS}	29,17	9,17	30,35 mg Kg ⁻¹
IRC	116,82 ^{**}	5,45	1,51	26,84

NS= não significativo a 5% de significância; **= significativo a 1% de probabilidade.

Houve diferença significativa entre os tratamentos para o índice relativo de clorofila (Tabela 6), entretanto, os valores obtidos para as plantas nutridas com os diferentes quelatos de Fe foram semelhantes entre si, mas superiores à testemunha.

Tabela 6 - Índice relativo de clorofila (IRC) das folhas de rúcula do primeiro experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

TRATAMENTO	IRC Média
TESTEMUNHA	18,82 b
IDHA	29,12 a
EDTA	28,00 a
ORGÂNICO	28,67 a
EDDHA	28,58 a
HBED	27,82 a
Teste F	116,82**
C.V. (%)	5,45
D.M.S.	1,51

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 1%.

4.3 Segundo experimento

4.3.1 Concentrações de Fe nas soluções nutritivas

Como no primeiro ciclo, as maiores concentrações médias de Fe foram obtidas nas soluções nutritivas com Fe-EDTA, Fe-EDDHA e Fe-HBED, logo após o uso delas por 10 dias (Tabela 7). As explicações para esses resultados foram discutidas no item 5.2.1.

Tabela 7 - Concentrações de ferro nas soluções nutritivas do segundo experimento, no momento do descarte, aos 10, 20 e 30 DAT de rúcula. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

TRATAMENTO	10	20	30
	DAT mg L ⁻¹		
TESTEMUNHA	-	-	-
IDHA	0,06	0,70	1,20
EDTA	0,29	4,70	6,30
ORGÂNICO	0,01	0,70	0,60
EDDHA	0,08	4,30	6,50
HBED	0,27	3,70	5,30

4.3.2 Crescimento das plantas

A análise de variância acusou interação significativa entre os tratamentos entre os períodos de cultivo para todas as variáveis analisadas, como observado no primeiro ciclo (altura, número de folhas, área foliar, massa fresca e seca da parte aérea e massa seca das raízes).

Para a altura das plantas foi possível ajustar equações de regressão quadrática ao longo do ciclo de cultivo, para todos os tratamentos, com exceção da

testemunha. Essa característica aumentou até o período final de avaliação (30 DAT), sendo que as plantas que receberam o quelato de Fe-HBED eram mais altas em relação à testemunha, aos 10 DAT. Aos 15 e 20 DAT, as plantas crescidas com Fe na solução nutritiva, independente do quelato, tinham maior altura em relação às plantas testemunhas. Por outro lado, os quelatos Fe-HBED e Fe-EDDHA proporcionaram aumento dessa característica em relação às plantas dos tratamentos controle e Fe-IDHA, aos 25 e 30 DAT (Figura 13).

O número de folhas aumentou linearmente para todos os tratamentos ao longo do ciclo de cultivo, com exceção da testemunha, onde não foi possível ajustar um modelo de regressão para os resultados obtidos. Aos 20 DAT, as plantas tratadas com Fe-HBED e Fe-EDDHA tinham maior número de folhas em relação às plantas do tratamento controle. Aos 25 e 30 DAT, todos os tratamentos foram superiores à testemunha para o número de folhas, assim como ocorreu para as plantas do primeiro ciclo de cultivo (Figura 14).

Houve aumento linear para a área foliar das plantas testemunhas ao longo do ciclo de cultivo. Para os demais tratamentos, ajustaram-se equações de regressão quadrática, sendo que aos 20 DAT as plantas que receberam Fe via solução nutritiva, independente do agente quelatizante, apresentaram maior área foliar comparadas à testemunha. Aos 25 DAT, as plantas crescidas com Fe-HBED tinham maior área foliar que as plantas dos tratamentos Fe-ORGÂNICO, Fe-IDHA e testemunha. Aos 30 DAT, por sua vez, os tratamentos Fe-HBED, Fe-EDDHA e Fe-EDTA foram superiores aos tratamentos Fe-ORGÂNICO, Fe-IDHA e testemunha (Figura 15).

Para as massas frescas da parte aérea das plantas, referentes aos tratamentos Fe-EDTA e Fe-EDDHA, foram ajustadas equações de regressão quadrática, e para os demais tratamentos foram ajustadas equações de regressão linear, ao longo do ciclo de cultivo. Aos 20 DAT, todos os tratamentos proporcionaram maiores valores de massa fresca da parte aérea da planta em relação à testemunha, sendo que aos 25 DAT as plantas dos tratamentos Fe-HBED e Fe-EDDHA tinham massas frescas semelhantes entre si e superiores ao tratamento Fe-IDHA e à testemunha (Figura 16). Aos 20, 25 e 30 DAT, todos os tratamentos proporcionaram maiores valores de massa seca da parte aérea da planta em relação à testemunha, assim como ocorreu para a massa fresca da parte aérea aos 20 DAT

(Figura 17), sendo que foi possível ajustar equações de regressão quadráticas para todos os tratamentos, com exceção da testemunha.

Para a massa seca das raízes foram ajustadas equações de regressão linear ao longo do tempo, referentes aos tratamentos testemunha, Fe-IDHA, Fe-EDTA, Fe-ORGÂNICO e Fe-HBED, e equação de regressão quadrática para o tratamento Fe-EDDHA. Houve aumento dessa variável ao longo do ciclo de cultivo para todos os tratamentos. Aos 25 DAT, as plantas crescidas com os quelatos de ferro tiveram massas secas das raízes semelhantes entre si, mas superiores à testemunha. Entretanto, aos 30 DAT, os tratamentos Fe-HBED e Fe-EDDHA foram semelhantes entre si e resultaram em aumento da massa seca das raízes das plantas em relação às plantas que receberam Fe-IDHA e à testemunha (Figura 18).

Figura 13 - Efeito dos quelatos de ferro na altura do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 14 - Efeito dos quelatos de ferro no número de folhas do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 15 - Efeito dos quelatos de ferro na área foliar do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 16 - Efeito dos quelatos de ferro na massa fresca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 17 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca da parte aérea do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Figura 18 - Efeito dos quelatos de ferro na massa seca das raízes do conjunto de plantas de rúcula, do segundo experimento, em função dos dias após o transplante das mudas. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

4.3.3 Teores de N e Fe nas folhas e índice relativo de clorofila

Não houve efeito significativo entre os tratamentos para a concentração de nitrogênio nas folhas de rúcula (Tabela 8), concordando com os resultados obtidos no primeiro ciclo. Entretanto houve diferença significativa entre os tratamentos para os teores foliares de Fe e índice relativo de clorofila (Tabela 8).

As plantas submetidas ao tratamento Fe-ORGÂNICO apresentaram teores semelhantes desse elemento nas folhas em relação aos obtidos para as plantas do tratamento Fe-EDTA, mas superiores aos demais.

Os resultados obtidos para o índice relativo de clorofila foram semelhantes aos observados para o primeiro ciclo, pois as plantas nutridas com os quelatos de Fe tiveram maior índice relativo de clorofila quando comparadas com as plantas testemunhas (Tabela 9).

Tabela 8 – Valores de F da análise de variância para os teores foliares de N e Fe, e índice relativo de clorofila (IRC) para o segundo experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

Características Avaliadas	Teste F	C.V.(%)	D.M.S.	Média Geral
Nitrogênio	1,34 ^{NS}	8,39	0,65	7,47 (g Kg ⁻¹)
Ferro	7,95 ^{**}	19,59	6,46	31,84 (mg Kg ⁻¹)
IRC	310,46 ^{**}	5,20	1,36	25,39

NS= não significativo a 5% de significância; **= significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 9 – Teores de ferro e índice relativo de clorofila (IRC) das folhas de rúcula do segundo experimento. Piracicaba, ESALQ/USP, 2012

TRATAMENTO	FERRO	IRC
	Média	
Testemunha	27,5 b	13,5 b
IDHA	29,3 b	27,5 a
EDTA	33,3 ab	28,5 a
ORGÂNICO	39,7 a	27,4 a
EDDHA	31,8 b	27,6 a
HBED	29,1 b	27,5 a
Teste F	7,95**	310,46**
C.V. (%)	19,59	5,2
D.M.S.	6,46	1,36

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 1%.

4.4 Discussão

O Fe é fundamental para o metabolismo do carbono (MILLER; PUSHNIK; WELKIE, 1984; NENOVA, STOYANOV, 1993) e do nitrogênio (SUZUKI; GADAL, 1982). Esse elemento retarda a senescência das folhas (GARG; HEMANTARANJAN; RAMESH, 1986), altera a estrutura e função do aparelho fotossintético e reduz a produção de clorofila nas folhas, com o aparecimento de pigmentos amarelos devido ao aumento de alguns carotenóides de cloroplastos (YUNTA et al., 2003). Os sintomas de deficiência de Fe ocorrem primeiramente nas folhas mais jovens, sendo caracterizados pela clorose entre as nervuras (RÖMHELD, 2001) e menor crescimento das plantas (SPEROTTO et al., 2007). Assim, a ausência desse elemento na solução nutritiva resultou no aparecimento de clorose internerval nas folhas e menor desenvolvimento das plantas de rúcula, nos dois ciclos de cultivo.

Os quelatos de Fe foram capazes de fornecer quantidades suficientes desse micronutriente para as plantas não manifestarem sintomas de deficiência de Fe. Esse resultado pode ser explicado pelos valores de pH entre 5,5 e 6,5 das soluções nutritivas, que mantiveram a estabilidade dos quelatos no meio. Segundo Yunta et al. (2003), na ausência de outros íons competidores, os agentes quelatizantes EDTA, IDHA, EDDHA e HBED são mais estáveis entre pH 1,5 e 7,0; 1,5 e 7,0; 3,5 e 10,0; e 3,5 e 13,0, respectivamente.

Entretanto, o tipo de quelato afetou o crescimento da rúcula, pois a eficiência de um produto em fornecer Fe para as plantas não depende somente do pH, mas também da sua capacidade em manter o Fe solúvel no meio de cultivo, da capacidade das plantas em assimilar os nutrientes e das condições ambientais (GARCÍA-MINA; CANTERA; ZAMARREÑO, 2003). Dessa forma, a superioridade, de maneira geral, dos agentes quelatizantes HBED e EDDHA em suprir Fe para as plantas em relação ao IDHA, observada aos 30 DAT, pode ser atribuída, também, à natureza da substância. O IDHA apresenta menor estabilidade e alta reatividade com outros elementos presentes no meio de cultivo (VILLÉN; GARCÍA-ARSUAGA; LUCENA, 2007) quando comparado ao EDDHA e HBED. Além disso, o agente quelatizante IDHA possui somente cinco grupos funcionais capazes de complexar o Fe (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010). Experimentos realizados com frutíferas, com o uso dos quelatos Fe-EDDHA, Fe-EDDHMA (Ácido etildiamino-di (o-hidroxi p-metil-fenil)-acético), Fe-EDDHSA (Ácido etileno-diamino -di (2-hidroxi 5-sulfofenilacético) e testemunha, não apontaram diferença entre os tratamentos para a variável área foliar (ÁLVARO-FERNÁNDEZ; GARCÍA-MARCO; LUCENA, 2005), discordando dos resultados obtidos nesse estudo. No cultivo hidropônico de tomate em lã de rocha, o EDTA foi mais eficiente que o IDHA em disponibilizar o Fe para as plantas. Nesse mesmo sistema de cultivo, os quelatos EDTA e IDHA não apresentaram diferença significativa entre si quanto à eficiência em liberar o Fe para as plantas de feijão verde (LUCENA et al., 2008).

Entretanto, o quelato EDDHA tem elevado preço no mercado, justificando o seu uso para culturas de elevado valor agregado ou em meios de cultivo com pH neutro ou alcalino (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010) onde não é possível utilizar agentes quelatizantes de menor estabilidade como o EDTA e o Fe-ORGÂNICO. O HBED também tem preço elevado no mercado e possui maior estabilidade que o EDDHA em valores de pH mais elevados, sendo ideal para o cultivo hidropônico com o uso de água com pH muito alcalino (LUCENA; CHANEY; 2007). Cabe ressaltar ainda que os quelatos EDTA, EDDHA e HBED são produtos recalcitrantes nos solos e nas águas, poluindo o ambiente (HYVÖNEN et al., 2003).

Os quelatos EDDHA, HBED e EDTA foram estatisticamente semelhantes ao Fe-ORGÂNICO para a maioria das características analisadas em ambos os ciclos de rúcula. Estudos realizados por Jie et al. (2008), com arroz, também mostraram que não houve diferença significativa entre os quelatos de FE-EDTA e Fe- ORGÂNICO

para a massa seca, altura e massa seca das raízes das plantas. Assim, os complexos de Fe com substâncias (aminoácidos, humatos, gluconatos, citratos) derivadas de produtos naturais são opções interessantes, pois poluem e custam menos que os quelatos de Fe inorgânicos (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010).

Os resultados obtidos nas tabelas (4 e 7) indicam maior permanência desses agentes quelatizantes (Fe-EDTA, Fe-EDDHA, Fe-HBED) no meio em relação ao quelato IDHA, que é biodegradável (NOVACK; VANBRIESEN, 2005) e ao agente complexante composto de aminoácidos, designado como Fe-ORGÂNICO. Os quelatos orgânicos reagem com diferentes compostos no meio de cultivo, apresentando estabilidade variável, o que pode explicar o menor teor de Fe disponível na solução nutritiva (LUCENA; APAOLAZA; LUCENA, 2010).

O efeito positivo no desenvolvimento das plantas com o uso de quelatos à base de aminoácidos já foi descrita anteriormente (BRETELIER; ARNOZIS, 1985; ASHMEAD, 1986), e observado em relação aos quelatos sintéticos (SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2002).

5 CONCLUSÕES

Nas condições experimentais, concluiu-se que:

Todos os quelatos possibilitaram fornecimento suficiente de ferro para o adequado crescimento e produtividade de rúcula em NFT;

As plantas de rúcula foram eficientes na absorção de ferro da solução nutritiva de todos os tratamentos acrescidos de ferro;

Não houve variação no teor de N e índice relativo de clorofila entre os tratamentos que continham ferro quelatizado;

O complexo Fe-ORGÂNICO pode ser uma alternativa eficiente e ambientalmente mais correta para o cultivo de rúcula do que os quelatos Fe-EDTA, Fe-HBED e Fe-EDDHA.

REFERÊNCIAS

- ABADIA, J. **Iron nutrition in soils and plant**. Dordrecht: Kluwer, 1995. 153 p.
- ADAMS, P. Crop nutrition in hydroponics. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 323, p. 289-305, 1992.
- _____. Nutrition of greenhouse vegetable in NFT and hydroponics systems. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 361, p. 254-257, 1994.
- ALBANO, J; MILLER, W.B. Light degrades iron-chelates in fertilizer solutions, affecting physiology of iron acquisition in Marigold (*Tagetes erecta L.*). **Southern Nurserymen's Association Conference**, Actworth, v. 40, p. 18-20, 1995.
- ALCAÑIZ, S.; CERDÁN, M.; JUARÉZ, M.; JORDÁ, J.; BERMÚDEZ, D.; SÁNCHEZ, A. Uptake of Fe (α,α -EDDHA) isomers by strategy I and II plants. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOILLESS CULTURE AND HYDROPONICS, 2004, Almeria. **Proceedings...**
- ÁLVAREZ-FERNANDEZ, A.; GARCIA-MARCO, S.; LUCENA, J.J. Evaluation of synthetic iron (III) chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to Correct iron chlorosis. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, p. 119–130, 2005.
- ALVES FILHO, M. Estudo constata novas propriedades da rúcula. **Jornal da UNICAMP**, Campinas, v. 17, p. 10, jun. 2002.
- AMORIM, H.C.; HENZ, G.P.; MATTOS, L.M. Identificação dos tipos de rúcula comercializados no varejo do Distrito Federal. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Hortaliças**, Brasília, v. 34, p. 1-13, 2007.
- ASHMEAD, H.D. The absorption mechanism of amino acids chelates by plants cells. In: ASHMEAD, H.D.; ASHMEAD, H.H.; MILLER, G.W.; HSU, H.H. **Foliar feeding of plants with amino acid chelates**. New Jersey: Noyes Publications, 1986. p. 219–235.
- AUDEBERT, A.; SAHRAWAT, K.L. Mechanisms for iron toxicity tolerance in lowland rice. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 23, p. 1877-1885, 2000.
- BECANA, M.; MORAN, J.F.; ITURBE-ORMAETXE, I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. **Plant and Soil**, The Hague, v. 201, p. 137-147, 1998.
- BOYER, R.F.; CLARK, H.M.; LA ROCHE, A.P. Reduction and release of ferritin iron by plants phenolics. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 32, p. 171-181, 1988.
- BRETELER, H.; ARNOZIS, P.A. Effect of amino compounds on nitrate utilization by roots of dwarf bean. **Phytochemistry**, New York, v. 24, p. 653–657, 1985.

BRIAT, J.; CURIE, C.; GAYMARD, F. Iron utilization and metabolism in plants. **Current Opinion Plant Biology**, London, v. 10, p. 276-282, 2007.

CAMARGO, L.S.A. **As hortaliças e seu cultivo**. 3. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 252 p.

CAMARGO FILHO, W. P.; MAZZEI, A. R. Mercado de verduras: planejamento, estratégia e comercialização. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 45-54, 2001.

CARVALHO, B.A. **Conheça melhor as hortaliças**. Campo Grande: EMPAER, 1988. 71 p.

CATALDO, D.A.; MCFADDEN, K.M.; GARLAND, T.R.; WILDUNG, R.E. Organic constituents and complexation of nickel (II), iron (III), cadmium (II) and plutonium (IV) in soybean xylem exudates. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 86, p. 734-739, 1988.

CAVARIANNI, R.L.; CECÍLIO FILHO, A.B.; CAZETTA, J.O.; MAY, A.; CORRADI, M.M. Nutrient contents and production of rocket as affected by nitrogen concentrations in the nutrients solution. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 652-658, 2008.

CHANEY, R.L.; BELL, P.F. Complexity of iron nutrition: lessons for plant-soil interaction research. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 10, p. 963-994, 1987.

COOK, J.D.; BAYNES, R.D.; SKIKNE, B.S. Iron deficiency and the measurement of iron status. **Nutrition Research Reviews**, Cambridge, v. 5, p. 189-202, 1992.

CURIE, C.; BRIAT, J.F. Iron transport and signaling in plants. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 54, p. 183-206, 2003.

EVANS, H.J.; SORGER, G.J. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 17, p. 47-76, 1966.

FAQUIN, V., FURLANI, P.R. Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 99-104, 1999.

FERRAREZI, R.S.; BATAGLIA, O.C.; FURLANI, P.R.; SCHAMMASS, E.A. Iron sources for citrus rootstock development grown on pine bark/vermiculite mixed substrate. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, p. 520-531, 2007.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003. 412 p.

FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.

FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica hidroponia NFT**. Campinas: Instituto Agronômico, 1998. 30 p.

FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 52 p.

GARCÍA-MINA, J.M.; CANTERA, R.; ZAMARREÑO, A. Interaction of different iron chelates with an alkaline and calcareous soil: a complementary methodology to evaluate the performance of iron compounds in the correction of iron chlorosis. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 10/11, p. 1943-1954, 2003.

GARCÍA-MINA, J.M.; ANTOLÍN, M.C.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M. Metal-Humic complexes and plant micronutrient uptake: A study based on different plant species cultivated in diverse soil types. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, p. 57–68, 2004.

GARG, O.K.; HEMANTARANJAN, A.; RAMESH, C. Effect of iron and zinc fertilization on senescence in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 9, p. 257–266, 1986.

GUERINOT, M.L.; YI, Y. Iron: nutritious, noxious and not readily available. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 104, p. 815-820, 1994.

GUERRA, G.M.P.; LUZ, J.M.Q.; HABER, L.L.; SILVA, M.A.D. **Cultivo hidropônico de rúcula em diferentes concentrações de solução nutritiva, em sistema NFT**. 2003. Disponível em: <http://www.abhorticultura.com.br/biblioteca/arquivos/download/biblioteca/44_647.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2013.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J.M.C. Role of free radicals and catalytic metal ions in human disease: an overview. **Methods in Enzymology**, New York, v. 189, p. 1-85, 1990.

HELL, R.; STEPHAN, U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. **Planta**, Berlin, v. 216, p. 541-551, 2003.

HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L.; LUCENA, J.J. Influence of the soil solution ratio, interaction time, and extractant on the evaluation of iron chelate sorption/desorption by soils. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 6, p. 2493-2500, 2011.

HYVÖNEN, H.; ORAMA, M.; SAARINEN, H.; AKSELA, R. Studies on biodegradable chelating agents: complexation of iminodisuccinic acid (ISA) with Cu (II), Zn (II), Mn (II) and Fe (III) ions in aqueous solution. **Green Chemistry**, London, v. 5, p. 410–414, 2003.

JAWORSKA, J.S.; SCHOWANECK, D.; EFEIJTEL, T.C.J. Environmental risk assessment for trisodium [s,s]-ethylene diamine disuccinate, a biodegradable chelator used in detergent applications. **Chemosphere**, Oxford, v. 38, n. 15, p. 3597-3625, 1999.

JIE, M.; RAZA, W.; XU, Y.C.; SHEN, Q. Preparation and optimization of amino acid chelated micronutrient fertilizer by hydrolyzation of chicken waste feathers and the effects on growth of rice. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 3, p. 571-582, 2008.

JONES, P.W.; WILLIAMS, D.R. Chemical speciation used to assess [S,S]-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) as a readily-biodegradable replacement for EDTA in radiochemical decontamination formulations. **Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, v. 54, p. 587-593, 2001.

KAMPFENKEL, K.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D. Effects of iron excess on *Nicotiana glauca*. Implications to oxidative stress. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 107, p. 725-735, 1995.

KOKSAL, A.L.; DUMANOGUL, H.; GUNES, N.T. The effect of different amino acids chelate foliar fertilizer on yield, fruit quality, shoot growth and Fe, Zn, Cu, Mn contents of leaves in Williams pear cultivar (*Pyrus communis* L.). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 23, p. 651-658, 1999.

KRAUSKOPF, K.B. Geochemistry of micronutrients. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 7-40.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology**: ecophysiology and stress physiology of functional groups. New York; Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. 506 p.

LEESON, S.; SUMMERS, J.D. **Nutrition of the chicken**. 4th ed. Guelph; Ontario: University Books, 2001. 591 p.

L'EPLATTENIER, F.; MURASE, I.; MARTELL, A.E. New multi dentate ligands. VI. Chelating tendency of N, N – di – (2-hydroxybenzyl) ethylenediamine – N, N – diacetic acid. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 89, p. 837–843, 1967.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils**, New York: Wiley, 1979. 449 p.

LOPES-RAYO, S.; HERNÁNDEZ, D.; LUCENA, J.J. Chemical evaluation. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Easton, v. 57, p. 8504-8513, 2009.

LOPES-RAYO, S.; CORREAS, C.; LUCENA, J.J. Novel. **Chemical Speciation and Bioavailability**, Surrey, v. 24, p. 147-158, 2012.

LUCENA, J.J. Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 10/11, p. 1969-1984, 2003.

_____. El empleo de complejantes y quelatos en La fertilización de micronutrientes. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, p. 527-535, 2009.

LUCENA, J.J.; CHANEY, R.L. Response of cucumber plants to low doses of different synthetic iron chelates in hydroponics. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, n. 5, p. 795-809, 2007.

LUCENA, J.J.; MANZANARES, M.; GARATE, A.A. A test to evaluate the efficacy of commercial Fe-chelates. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 10, p. 1553-1566, 1992.

LUCENA, J.J.; SENTÍS, J.A.; VILLÉN, M.; LAO, T.; PÉREZ-SÁEZ, M. IDHA chelates as a micronutrient source for green bean and tomato in fertigation and hydroponics. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 813-818, 2008.

LUCENA, P.R.; APAOLAZA, L.H.; LUCENA, J.J. Comparison of iron chelates and complexes supplied as foliar sprays and in nutrient solution to correct iron chlorosis of soybean. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, Weinheim, v. 173, p. 120-126, 2010.

MA, R.; MOTEKAITIS, R.; MARTELL, A.E. Stability. **Inorganica Chimica Acta**, Lausanne, v. 224, p. 151-155, 1994.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 631 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 672 p.

MARSCHNER, H.; ROHMELD, V. Strategies of plants for acquisition of iron. **Plant and Soil**, The Hague, v. 165, p. 378-388, 1994.

MARTENS, D.C.; WESTERMANN, D.T. Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies. In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. (Ed.). **Micrunutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. P. 549-592. (SSSA Books Series, 4).

MARTINEZ, H.E.P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. 2. ed. Viçosa :UFV, 1999. 76 p.

MATTOS JÚNIOR, D.; BAAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A. Nutrição dos citros. In: MATTOS, JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JÚNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundag, 2005. p. 1-18.

MILLER, G.W.; PUSHNIK, J.C.; WELKIE, G.W. Iron chlorosis, a world-wide problem, the relation of chlorophyll biosynthesis to iron. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, p. 1–22, 1984.

MINAMI, K. **Produção de mudas de alta qualidade em horticultura**. Campinas: Fundação Farah Maluf, 1995. 128 p.

MINAMI, K.; TESSARIOLI NETO, J. **A cultura da rúcula**. Piracicaba: ESALQ, 1998. 19 p.

MITSCHKER, A.; MORITZ, R.J., NAWROCKI, A. **Chelated plant micronutrients**. Berlin: Bayer Chemicals AG, 2004. 7 p.

MOORE, D.P. Mechanisms of micronutrient uptake by plants. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.). **Micronutrient in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 17.

MORALES, M.; JANICK, J. Arugula: a promising specialty leaf vegetable, In: JANICK, J.; WHIPKEY, A. **Trends in new crops and new uses**. Alexandria: ASHS Press, 2002. p. 418-423.

MOREL, F.M.M.; HERING, J.G. **Principles and applications of aquatic chemistry: complexation**. New York: Wiley, 1993. 588 p.

MORGAN G.; DREW, H. Research on residual affinity and coordination. II. Acetylacetones of selenium and tellurium. **Journal of the Chemical Society**, London, v. 117, p. 1456-1465, 1920.

NATT, C. Effect of slow release iron fertilizers on chlorosis in grape. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, p. 1891-1912, 1992.

NENOVA, V.; STOYANOV, I. Physiological and biochemical changes in young maize plants under iron deficiency I. Growth and photosynthesis. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, p. 835-849, 1993.

NORVELL, W.A. Reactions of metal chelates in soil and nutrient solutions. In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHURMAN, L.M.; WELCH, R.M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 187-227.

NOVACK, B.; VANBRIESEN, J.M. Biodegradation of chelating agents: EDTA, DTPA, PDTA, NTA, and EDDS. In: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Biogeochemistry of chelating agents**. Washington, 2005. p. 150-170. (ACS Symposium).

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Anemia nutricionais**, Genebra, 1972. 456 p.

PADULOSI, S.; PIGNONE, D. **Rocket: a Mediterranean crop for the world**. Rome: International Plant Genetic Resources Institute, 1997. 101 p.

PÉREZ-SANZ, A.; LUCENA, J.J. Synthetic iron oxides as sources of Fe in a hydroponic culture of sunflower. In: ABADIA, J. **Iron nutrition in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1995. p. 241-246.

PIETRO MARTINEZ, H.E.; SILVA FILHO, J.B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 111p.

PIGNONE, D. Present status of rocket genetic resources and conservation activities. In: PADULOSI, S.; PIGNONE, D. **Rocket: a Mediterranean crop for the world**. Rome: International Plant Genetic Resources Institute, 1997. p. 51-66.

PONNAMPERUMA, F.N.; BRADFIELD, R.; PEECH, M. Physiological disease of rice attribute to iron toxicity. **Nature**, London, v. 175, p. 265, 1955.

PURQUERIO, L.F.V. **Crescimento, produção e qualidade de rúcula (*Eruca sativa* Miller) em função do nitrogênio e da densidade de plantio**, 119 p. Tese (Doutorado em Horticultura) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

PURQUERIO, L.F.V.; TIVELLI, S.W. **O mercado da rúcula**. 2007.
<<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Rucula/Rucula.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

REGHIN, M.Y.; OTTO, R.F.; VINNE, J.V.D. Efeito da densidade de mudas por célula e do volume da célula na produção de mudas e cultivo da rúcula. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 28, p. 287-295, 2004.

REGHIN, M.Y.; OTTO, R.F.; OLINIK, J.R., JACOBY, C.F.S. Efeito do espaçamento e do número de mudas por cova na produção de rúcula nas estações de outono e inverno. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 953-959, 2005.

ROMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; VAN RAIJ, B.; ABREU, C.A. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPQ; FAPESP; POTAFOS, 2001. p. 71-86.

SALA, F.C.; ROSSI, F.; FABRI, E.G.; RONDINO, E.; MINMI, K.; COSTA, C.P. Caracterização varietal de rúcula. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, HORTICULTURA BRASILEIRA, 44., 2004, Campo Grande. **Anais...**

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, A.; SÁNCHEZ-ANDREU, J.; JUÁREZ, M.; JORDÁ, J.; BERMÚDEZ, D. Humic substances and amino acids improve effectiveness of chelate FeEDDHA in lemon trees. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, p. 2433–2442, 2002.

SANTAMARIA, P.; ELIA, A.; PAPA, G.; SERIO, F. Nitrate and ammonium nutrition in chicory and rocket salad plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 9, p. 1779-1789, 1998.

SANTOS, H.S.; ZATARIM, M.; GOTTO, R. Influência da densidade e do sistema de semeadura na produção de rúcula. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 2, 2002.

SPEROTTO, R.A.; RICACHENEVSKY, F.K.; FETT, J.P. Iron deficiency in rice shoots: identification of novel induced genes using RDA and possible relation to leaf senescence. **Plant Cell Reports**, Berlin, v. 26, p. 1399-1411, 2007.

SPEROTTO, R.A.; BOFF, T.; DUARTE, G.L.; FETT, J.P. Increased senescence associated gene expression and lipid peroxidation induced by iron deficiency in rice roots. **Plant Cell Reports**, Berlin, v. 27, p. 183-195, 2008.

STEPHAN, U.W.; SCHOLZ, G. Nicotianamine: mediator of transport of iron and heavy metals in the phloem? **Plant Physiology**, Lancaster, v. 88, p. 522-529, 1993.

SUZUKI, A.; GADAL, P. Glutamate synthase from rice leaves. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 69, p. 848-852, 1982.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAKAOKA, M.; MINAMI, K. Efeito do espaçamento entre linhas sobre a produção de rúcula (*Eruca sativa* L.). **O Solo**, Piracicaba, v. 2, n. 76, p. 51-55, 1984.

TANDY, S.; BOSSART, K.; MUELLER, R.; RITSCHER, J.; HAUSER, L.; SCHULIN, R.; NOWACK, B. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents. **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 38, p. 937-944, 2004.

TEIXEIRA, T.N. **Hidroponia**: uma alternativa para pequenas propriedades. Guaíba: Editora Agropecuária. 1996. 86 p.

TRANI, P.E.; FORNASIER, J.B.; LISBÃO, R.S. **Cultura da rúcula**. Campinas: IAC, 1992. 8 p. (Boletim, 146).

TRANI, P.E.; GRANJA, N.P.; BASSO, L.C.; DIAS, D.C.F.S.; MINAMI, K. Produção e acúmulo de nitrato pela rúcula afetados por doses de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 12, n. 1, p. 25-29, 1994.

TRANI, P.E.; PASSOS, F.A. Rúcula (Pinhão). In: FAHL, J.I.; CAMARGO, M.B.P.; PIZINATTO, M.A.; BETTI, J.A.; MELO, A.M.T.; DEMARIA, I.C.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. Campinas: IAC, 1998. p. 241-242.

VILLÉN, M.; GARCÍA-ARSUAGA, M.; LUCENA, J.J. Potential use of biodegradable chelate N-(1,2-dicarboxyethyl)-D,L-aspartic acid/ Fe^{3+} as an Fe fertilizer. **Journal of Agriculture Food Chemistry**, Easton, v. 55, p. 402-407, 2007.

WENGER, K.; TANDY, S.; NOWACK, B. Effects of chelating agents on trace metal speciation and bioavailability. In: NOWACK, B.; VANBRIESEN, J.M. **Biogeochemistry of chelating agents**. Washington: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2005. p. 204-224.

WERNER, A. Beitrag zur Konstitution Anaorganischer Verbindungen, Z. **Anorg Allgem Chem**, Weinheim, v. 3, p. 267-330, 1893.

WILKINSON, G. **Comprehensive coordination chemistry**. Oxford: Pergamon Press, 1987. 413 p.

WINSLOW, M.D.; YAMAUCHI, M.; ALLURI, K.; MASAJO T.M. Reducing iron toxicity in rice with resistant genotype and ridge planting. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 458-460, 1989.

YAMAGUCHI, M. **World vegetables:** principles, production, and nutritive value. Davis: University of California, 1978. 226 p.

YUNTA, F.; LOPES-RAYO, S.; LUCENA, J.J. Thermodynamic database update to model synthetic chelating agents in soils systems. **Journal of Applied Solution Chemistry and Modeling**, Mississauga, v. 1, p. 46-64, 2012.

YUNTA, F.; SIERRA, M.A.; GÓMEZ-GALLEGO, M.; ALCAZÁR, R.; GARCÍA-MARCO, S.; LUCENA, J.J. Methodology to screen Ney iron chelates: prediction of their behavior in nutrient solution and soil conditions. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 10/11, p. 1955-1968, 2003.