

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

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO NA BIOFORTIFICAÇÃO DE  
RÚCULA**

**Sergio Manuel Rugeles Reyes**

Engenheiro Agrônomo

**2017**

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

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO NA BIOFORTIFICAÇÃO DE  
RÚCULA**

**Sergio Manuel Rugeles Reyes**

**Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho**

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

**2017**

Rugeles Reyes, Sergio Manuel  
R928a Aplicação foliar de zinco na biofortificação de rúcula / Sergio  
Manuel Rugeles Reyes. -- Jaboticabal, 2017  
iii, 40 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017  
Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho  
Banca examinadora: Hilário Junior de Almeida, Roberto Botelho  
Ferraz Branco  
Bibliografia

1. *Eruca sativa*. 2. Sistema imunológico. 3. Fertilização foliar. 4.  
Micronutriente. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias.

CDU 635.5:631.4

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

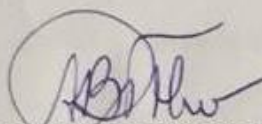
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO NA BIOFORTIFICAÇÃO DE RÚCULA**

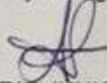
**AUTOR: SERGIO MANUEL RUGELES REYES**

**ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO**

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



Prof. Dr. ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO  
Departamento de Produção Vegetal / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Pesquisador Dr. HILÁRIO JÚNIOR DE ALMEIDA  
Engenheiro Agrônomo Autônomo / Jaboticabal/SP



Pesquisador Dr. ROBERTO BOTELHO FERRAZ BRANCO  
APTA - Polo Regional do Centro Leste / Ribeirão Preto/SP

Jaboticabal, 11 de outubro de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**SERGIO MANUEL RUGELES REYES** – Nascido em Guadalupe, Santander, Colômbia, em 1990, filho de Jaqueline Reyes Silva e Rogerio Rugeles Chacón. Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Nacional de Colômbia, Sede Bogotá em 2013. Realizou seu estágio de conclusão de graduação na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, em Piracicaba (SP). Tem trabalhado como profissional no programa de 'Jovens Pesquisadores' de Colciencias- Universidade Nacional de Colômbia. Além disso, trabalhou como pesquisador auxiliar no grupo de pesquisa de batata, na mesma universidade. Em março de 2016 ingressou no Mestrado do programa de pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho'- UNESP, Câmpus Jaboticabal.

“A vida de cada homem é um caminho para si mesmo,  
o ensaio de um caminho, o esboço de uma vereda”.

Hermann Hesse

A Oscar (*in memoriam*), amigo e irmão, parceiro de vivências, lutador incansável que sempre encontrou as palavras para me ajudar nos momentos difíceis e me ensinou o valor da verdadeira amizade.

A Lulú, ser de luz que conseguiu despertar o mais puro amor em uma família.

Ofereço e Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder as melhores oportunidades e por sempre me mostrar o caminho a seguir.

A meus pais, especialmente a minha mãe, Jaqueline Reyes Silva, pelo apoio, carinho, compressão e confiança, por me ensinar o valor do esforço e trabalho.

A meus irmãos, porque têm sido meu motor para não desistir e continuar.

A Jennifer, mulher que trouxe tranquilidade nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, pela orientação, confiança e conselhos durante esses dois anos.

Aos colegas e amigos da UNESP, especialmente a Miguel, Domingos, Paola e Nely, por sua valiosa amizade e porque sempre encontraram as palavras certas nos dias difíceis.

A CAPES pela concessão da bolsa durante a condução do mestrado.

A todas as pessoas que de uma ou outra forma, contribuíram com a realização deste trabalho.



## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Biofortificação agrônômica com zinco .....	3
2.2 Zinco nos humanos .....	4
2.3 Zinco nas plantas .....	5
2.4 Aplicação foliar de zinco .....	7
2.5 Rúcula .....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	10
3.1 Localização e características da área experimental .....	10
3.2 Tratamentos e delineamento experimental .....	11
3.3 Instalação e condução do experimento .....	11
3.4 Características avaliadas .....	12
3.5 Análise estatística .....	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	14
4.1 Características fisiológicas .....	14
4.2 Crescimento .....	16
4.3 Estado nutricional e biofortificação .....	19
5 CONCLUSÕES .....	28
6 REFERÊNCIAS .....	29

## APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO NA BIOFORTIFICAÇÃO DE RÚCULA

**RESUMO-** A deficiência de zinco atinge um terço da população mundial e uma estratégia para solucionar essa problemática é a biofortificação agronômica de hortaliças. A rúcula tem ganhado notoriedade nos últimos anos devido às suas propriedades nutricionais e boa aceitação pelos consumidores. Em razão do incremento no seu consumo, torna-se uma hortaliça folhosa com alto potencial para estudos de biofortificação agronômica com zinco, porém, ainda são poucas as pesquisas feitas a respeito. Assim, em um solo com alto teor do micronutriente, objetivou-se avaliar o efeito de aplicações foliares de zinco, em diferentes épocas, sobre parâmetros fisiológicos, produtivos e nutricionais de rúcula 'Folha larga', visando à biofortificação agronômica. O experimento foi instalado na UNESP, câmpus Jaboticabal e foram avaliados dois fatores: dose de Zn (0,5; 1 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de Zn) e épocas de aplicação (15 dias após a emergência - DAE, 20 DAE, 25 DAE, 15 e 20 DAE e 15, 20 e 25 DAE) mais um controle, que não recebeu aplicação de zinco. Observou-se que não houve efeito dos fatores nem da interação nas variáveis fisiológicas, assim como na altura, área foliar e massa fresca da parte aérea. Doses de Zn afetaram os teores de N, Mn e P, enquanto para Cu e Fe não foram encontrados efeitos significativos. Verificou-se que com aplicação de 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, feita aos 25 DAE, obteve-se maior teor de Zn nas folhas de rúcula, representando incremento de 279% em relação ao controle, denotando a efetividade de aplicações foliares de zinco como estratégia de biofortificação em rúcula.

Palavras-chave: *Eruca sativa*, sistema imunológico, fertilização foliar, micronutriente.

## FOLIAR APPLICATION OF ZINC IN THE BIOFORTIFICATION OF ARUGULA

**ABSTRACT** - Zinc deficiency affects a third of the world population and a strategy to solve this problem is agronomic biofortification of vegetables. Arugula has gained importance in recent years due to its nutritional properties and good acceptance by consumers. Due to the increase in its consumption, it becomes a leafy vegetable with high potential for studies of agronomic biofortification with zinc, however, few researches have been done about them. Thus, in a soil with high micronutrient content, the objective was to evaluate the effect of foliar zinc applications, at different times, on physiological, productive and nutritional parameters of 'Broad Leaf' arugula, aiming at agronomic biofortification. The experiment was realized at UNESP, Jaboticabal Campus and two factors were evaluated: Zn dose (0.5, 1 and 1.5 kg ha<sup>-1</sup> of Zn) and times of application (15 days after emergence - DAE, 20 DAE, 25 DAE, 15 and 20 DAE, and 15, 20 and 25 DAE) plus one control, which did not receive zinc application. It was observed that there was no effect of the factors or the interaction in the physiological variables, as well as in the height, leaf area and fresh mass of the aerial part. Doses of Zn affected the contents of N, Mn and P, whereas for Cu and Fe no significant effects were found. It was verified that with the application of 1.5 kg ha<sup>-1</sup> of Zn, realized at 25 DAE, a higher Zn content was obtained in the arugula leaves, representing an increase of 279% in relation to the control, showing the effectiveness of foliar applications of zinc as a biofortification strategy in arugula.

**Key words:** *Eruca sativa*, immune system, foliar fertilization, micronutrient.

## 1 INTRODUÇÃO

O ser humano necessita de pelo menos 22 nutrientes para manter seu metabolismo adequado e saudável (GRAHAM et al., 2007), sendo os alimentos o principal meio de fornecer esses nutrientes. O zinco faz parte deste grupo, classificando-se como um micronutriente (NEWELL-MCGLOUGHLIN, 2008), com requerimentos diários de 11 mg para um adulto de sexo masculino (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, 2016). O Zn desempenha diversas funções, estando relacionado com o funcionamento do sistema imunológico, função sensorial, desenvolvimento neurocomportamental, saúde reprodutiva, crescimento e desenvolvimento físico (HOTZ; BROWN, 2004).

Apesar da sua importância na saúde humana, os principais alimentos consumidos nos países em desenvolvimento apresentam baixos teores do micronutriente, tornando seu consumo insuficiente para atender aos requerimentos mínimos diários (CARVALHO; VASCONCELOS, 2013).

Estima-se que um terço da população mundial é deficiente em zinco (MUTHAYYA et al., 2013), sendo relacionada com atraso no desenvolvimento físico e sexual, doenças na pele e anorexia, além do risco de mortalidade infantil e redução na capacidade de trabalho em adultos (CIP, 2010). Essa situação é atribuída a diferentes fatores como a limitada capacidade de acumulação mineral nos tecidos de interesse, assim como a produção de alimentos em solos com baixos teores do nutriente (WHITE; BROADLEY, 2005; GRAHAM et al., 2007).

Nas áreas agrícolas do Brasil, a deficiência de zinco em plantas é a mais comum dentre os micronutrientes, sendo frequente nos Latossolos do cerrado (LOPES; GUILHERME, 2016). Segundo Cunha et al. (2008), práticas que visam à redução da acidez do solo podem diminuir a disponibilidade do Zn para as plantas, devido a adsorção do elemento pelos colóides do solo.

Em vista disto, para solucionar este problema, nos últimos anos, têm-se desenvolvido diferentes estratégias para enriquecer os alimentos. A biofortificação uma delas. Esta técnica é definida como o processo para produção de culturas com concentrações de minerais e vitaminas que permitam fornecer os requerimentos

nutricionais no organismo humano (BONIERBALE et al., 2011). Dentro desse tema se encontra a biofortificação agronômica, que objetiva adicionar nutrientes à planta por meio da aplicação de fertilizantes via solo, foliar ou semente (SALTZMAN et al., 2013). Salienta-se que é uma técnica relativamente barata e eficiente para aumentar a qualidade nutricional dos alimentos (INOCÊNCIO, 2014).

O sucesso da biofortificação agronômica com zinco está intrinsicamente relacionado com a forma de aplicação do micronutriente (VELU et al., 2013). Em culturas como trigo, tem-se avaliado a eficiência da aplicação ao solo e foliar de diferentes fontes de Zn. Verificaram-se nestes trabalhos aumentos na concentração do micronutriente e produtividade com aplicações foliares (CAKMAK; PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2010; CAKMAK et al., 2010; ZHANG et al., 2010). Em batata, canola e repolho, Mao et al. (2014) relataram aumentos nos teores de Zn, com aplicações foliares de sulfato de zinco. Contudo, ainda são poucas as pesquisas relacionadas à biofortificação agronômica em hortaliças folhosas.

No Brasil, nos últimos anos, observa-se diversificação no consumo de hortaliças como consequência do aumento da renda e maior preocupação com a qualidade da alimentação (SOUZA, 2014). Atualmente, a hortaliça folhosa mais plantada é a alface; porém, desde finais da década de 90, a rúcula (*Eruca sativa* L) tem ganhando mercado, registrando-se aumento nas quantidades comercializadas (ALVES; SÁ, 2010), devido suas qualidades nutricionais e ao sabor picante de suas folhas, que podem ser servidas como saladas ou acompanhamento de carnes (MATSUZAKI, 2013).

Segundo Laurett (2015), o sucesso dos programas de biofortificação depende da escolha de culturas que são consumidas comumente pela população. Em virtude do aumento significativo no consumo de rúcula na população brasileira, essa se apresenta como uma cultura com potencial para biofortificação com zinco.

Diante do exposto, e por encontrar poucas pesquisas relacionadas com as respostas de produtividade e de qualidade nutricional da rúcula à fertilização com zinco, objetivou-se avaliar o efeito de doses e época de aplicação de zinco via foliar na produtividade, fisiologia e nutrição mineral da rúcula, em um solo com alto teor do nutriente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Biofortificação agronômica com zinco

A biofortificação de culturas com micronutrientes, através de diferentes ferramentas como o melhoramento genético ou a aplicação de fertilizantes, é uma maneira sustentável e eficaz para trabalhar a problemática de desnutrição humana (CAKMAK, 2008). No entanto, o melhoramento de culturas visando aumentar as concentrações de micronutrientes nos órgãos de interesse, também conhecida como biofortificação genética, apresenta algumas limitações, como a produção em solos com teores muito baixos de micronutrientes, quanto a dificuldade de encontrar variação genotípica suficiente e que o caráter para concentração de micronutrientes seja estável em diversos ambientes (LYONS et al., 2005). Com base nisso, a biofortificação agronômica, definida como a adição de nutrientes à planta via adubação ao solo e foliar (SALTZMAN et al., 2013), pode ser uma solução a curto prazo, rápida e facilmente aplicável para aliviar a deficiência de micronutrientes (CAKMAK, 2008; KHOSHGOFTARMANESH et al., 2010).

Os elementos minerais no solo podem estar presentes como íons livres, compostos dissolvidos ou precipitados, adsorvidos superficialmente ou contidos na biota do solo (WHITE; BROADLEY, 2009), ocasionando baixa fitodisponibilidade. Exemplo disso é o zinco, que pode ser adsorvido diretamente pelos óxidos de ferro, manganês e alumínio (HAN et al., 2011). Apesar de que em muitas regiões sua concentração seja suficiente para atender à demanda das culturas (GRAHAM et al., 1999), sua absorção às vezes é limitada. Dentre as estratégias agronômicas visando aumentar a disponibilidade de Zn para as plantas está a solubilização e mobilização do Zn no solo (CARVALHO; VASCONCELOS, 2013), assim como aplicação de fertilizantes, sendo as fontes mais utilizadas o sulfato de zinco, cloreto de zinco, óxido de zinco e quelatos (FAGERIA, 2009).

Nos estudos de biofortificação agronômica com Zn, o solo é a principal via de aplicação (INOCÊNCIO, 2014), encontrando-se resultados positivos de aumento das concentrações de zinco em culturas folhosas, de hastes e de raízes (WHITE;

BROADLEY, 2011). Contudo, pesquisas em diferentes culturas indicam melhores resultados quando a fertilização é foliar (KHOSHGOFTARMANESH et al., 2010; CAKMAK; PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2010; WANG et al., 2012). Segundo White e Broadley (2011), a diferença entre as duas vias de aplicação é que com elevadas quantidades de Zn aplicadas no solo, as células das raízes exibem altas concentrações do micronutriente, muito superiores às encontradas na parte aérea, ocasionando toxicidade e limitando a produtividade.

Aplicações de Zn foliares e ao solo também apresentam resposta quando o órgão de interesse são frutas, sementes ou tubérculos (WHITE et al., 2009; CAKMAK; PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2010; FANG et al., 2008), porém, incrementar a concentração nesses tecidos requer uma mobilidade adequada de Zn no floema, o que pode limitar o acúmulo do elemento (BROADLEY et al., 2007; CAKMAK; PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2010).

Para hortaliças, diferentes estudos relacionados a esse tema têm sido feitos. Mao et al. (2014) estudaram o efeito da aplicação ao solo de 100 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de zinco em batata, repolho e colza. Os autores relataram aumento no teor de Zn em repolho e colza; embora, não foi observado efeito da aplicação sobre a produtividade e teores de macro e micronutrientes. Lima, Nascimento e Sousa (2015), avaliando o efeito de doses de Zn (0, 50, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de solo), nos teores do elemento nas partes comestíveis das plantas de cenoura, couve e quiabo, encontraram que a couve exibiu maior potencial para concentrar Zn nas folhas, que na raiz da cenoura e fruto do quiabo. Por outro lado, com o incremento das doses, aumentaram os teores de Zn, Fe, Mn e Cu nos diferentes órgãos da planta. Em alface crespa, Yucel et al. (2013), trabalhando com aplicações foliares de Zn (0, 0,01; 0,02 e 0,03%), encontraram maior biomassa, número de folhas e massa de cabeça com a dose de 0,01%, enquanto com 0,03% aumentou o teor de nitrato nas folhas.

## **2.2 Zinco nos humanos**

O zinco é um elemento essencial na nutrição humana (GRAHAM et al., 2007), requerendo-se uma ingestão diária de 3 a 17 mg, dependendo do gênero e idade (SHARMA et al., 2013). Sua deficiência está presente em mais de dois milhões de

peças no mundo (CAKMAK; PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2010), sendo causada pela baixa ingestão de alimentos ricos no nutriente (KUTMAN; YILDIZ; CAKMAK, 2011). Os sintomas de deficiência incluem diarreia, pneumonia e atrofia, contribuindo significativamente para a morte de crianças menores de 5 anos (STEIN et al., 2005). Além disso, tem sido relacionado com o aumento dos riscos de doenças infecciosas (GIBSON; HESS; BROWN, 2008) e incidência de câncer (PFEIFFER; MCCLAFFERTY, 2007).

O Zn no organismo humano tem múltiplas funções, como a influência na proteção estrutural, integridade de membranas biológicas, diminuição da toxicidade por radicais livres, melhor funcionamento do cérebro, síntese de proteínas e resistência do sistema imunológico (GIBSON, 2006). Segundo Bertini e Rosata (2007), 10% das enzimas possuem o Zn como constituinte.

### **2.3 Zinco nas plantas**

O zinco em plantas é requerido principalmente na síntese de proteínas, participando na formação de triptofano, precursor do ácido indol acético (INOCÊNCIO, 2014). Enzimas que contêm zinco são essenciais no metabolismo dos lipídeos, ácidos nucleicos, proteínas e carboidratos (LUKASKI, 1995). O zinco faz parte de mais de 70 metaloenzimas, sendo suas formas predominantes complexos de baixo peso molecular, íons livres e formas insolúveis associadas à divisão celular (BROWN; CAKMAK; ZHANG, 1993). Também, o elemento em plantas superiores regula a atividade de enzimas tais como aldolases, isomerases, desidrogenases (MARSCHNER, 2012).

As principais alterações nas plantas, quando deficientes em zinco, são: diminuição da fotossíntese devido a danos nos cloroplastos, o que acarreta desarranjo no transporte eletrônico (ABBAS et al., 2009); redução da atividade da polimerase de RNA, provocando aumento de aminoácidos; baixa atividade da dismutase de superóxido elevando o teor de radicais livres de  $O_2$ , o vazamento de solutos e perda da integridade das membranas (FURLANI, 2004). No entanto, concentrações acima de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn, no solo, podem ter efeitos negativos na fisiologia e metabolismo, limitando a produtividade das culturas (EHSAN et al.,



2013). Entre os principais sintomas de toxicidade por Zn estão: inibição do crescimento e clorose nas folhas (TEWARI; KUMAR; SHARMA, 2008); alteração na absorção de nutrientes; dano à integridade e permeabilidade das membranas celulares, gerando radicais livres de  $O_2$  e prejudicando, também, a fotossíntese (UPADHYAYA et al., 2010; CAMBROLLÉ et al., 2012).

Esse elemento é absorvido na forma de  $Zn^{2+}$  ou em alguns casos, como complexo Zn-fitosideróforo (BROADLEY et al., 2007), sendo transportado via simplasto da raiz até o xilema; porém, uma fração substancial pode atingir o xilema via apoplasto (WHITE et al., 2002). No citosol das células radiculares, o  $Zn^{2+}$  é complexado por diversas proteínas, incluídas as que modulam atividades enzimáticas ou transcrição de genes, fazendo que sua concentração citossólica seja extremamente baixa (CLEMENS, 2010). O carregamento de Zn no xilema parece estar modulado por duas proteínas, a YSL (yellow strip like proteins), que coloca o zinco em forma complexada com nicotiamina, e AtFRD3, que carrega citrato no xilema para promover seu transporte (CURIE et al., 2009; WATERS; SANKARAN, 2011). Já no floema, o zinco é transportado complexado com nicotiamina ou com pequenas proteínas (WHITE; BROADLEY, 2009), e seu carregamento está condicionado por proteínas do grupo ZIP e YSL (CURIE et al., 2009; WHITE; BROADLEY, 2009). Contudo, é considerado, geralmente, como elemento de baixa mobilidade em floema (FAGERIA, 2009).

Quando o zinco é fornecido via solo, a concentração do elemento nos tecidos apresenta a seguinte ordem: raiz  $\approx$  parte aérea  $>$  frutos, sementes, tubérculos. Em consequência, suas concentrações são maiores em culturas de raízes e hortaliças folhosas que em frutos e grãos (BROADLEY et al., 2012). Em cada órgão da planta, o zinco é acumulado em tipos de células específicas. Exemplo disso acontece na raiz, onde o elemento se localiza, principalmente, na região de alongação (STEVENINCK et al., 1994). Nas folhas, o acúmulo depende da espécie, já que se tem observado maiores concentrações nas células da epiderme em comparação com as do mesofilo, para espécies como *Noccaea caerulescens* (MONSANT; WANG; TANG, 2010), enquanto em *Arabidopsis halleri* e *Alyssum murale*, as células do mesofilo apresentam concentrações mais altas que os tricomas e as células epidérmicas (ZHAO et al., 2000; TAPPERO et al., 2007).

White e Brown (2010), afirmam que para atingir máxima produtividade, a maioria de culturas requerem teores foliares de Zn acima de 15-30 mg kg<sup>-1</sup>. Contudo, a presença do Zn nos tecidos da planta depende da biodisponibilidade e concentração no solo, sendo regulada por diversos fatores químicos e físicos, como pH, teor de carbonato de cálcio, presença de óxidos, umidade do solo e teor de matéria orgânica (CAKMAK, 2008), assim como a espécie vegetal (FAGERIA, 2009). De forma geral, a teor foliar de Zn é menor em plantas das famílias Lineaceae, Solanaceae e Poaceae e maior em Brassicaceae, Amaranthaceae e Salicaceae (BROADLEY et al., 2007).

#### **2.4 Aplicação foliar de zinco**

As doses de zinco requeridas pelas culturas são geralmente pequenas, havendo problemas na distribuição uniforme do fertilizante via solo (RIBEIRO; SANTOS, 1996). Em consequência, a aplicação foliar de zinco apresenta-se como alternativa que oferece diversas vantagens, tais como menores perdas por fixação no solo e baixas taxas de aplicação (NASRI; KHALATBARI; FARAHANI, 2011).

No Brasil, em culturas como o cafeeiro e a laranjeira, são comuns aplicações foliares de Zn, utilizando-se diferentes fontes como: cloreto, sulfato, oxisulfato, nitrato, carbonatos, quelatos e fosfito (GUEDES, 2012). Dentre esses, os sais metálicos como sulfatos, cloretos e nitratos são solúveis em água e são mais caros por unidade de nutriente (LOPES, 1999).

A eficiência da aplicação foliar de Zn depende de diversos fatores que influenciam a absorção do elemento pelas folhas, como as condições climáticas, as características das folhas e de suas cutículas, e as características químicas da fonte de zinco utilizada (RENA; FÁVARO, 2000). Em relação ao último fator, Ramani e Kannan (1985) destacam que a natureza da molécula que acompanha ao zinco é a que determina as características de movimento pela cutícula e a translocação no tecido vascular. Em feijão e café, Lima et al. (2005) verificaram que em aplicações foliares, o Zn foi mais absorvido quando se utilizou sulfato que EDTA. Sartori (2007), em citros, observou teores mais baixos de zinco quando foi usado EDTA, atribuindo o efeito à quelatização do Zn pela molécula. Yanyan, Shohag e Yang (2012)

encontraram maiores concentrações de Zn nos grãos de arroz quando se utilizou sulfato, comparado com Zn-EDTA e Zn-citrato. Guedes (2012), estudou o efeito de diferentes fontes de zinco marcadas isotopicamente com  $^{68}\text{Zn}$  em laranja, e encontrou que 24 horas após a aplicação, apresentava-se a seguinte ordem decrescente de absorção: fosfito > sulfato = EDTA = Quelato de aminoácido > cloreto. A resposta diferencial na penetração foliar das fontes de zinco é dependente do seu peso molecular, já que ao ser menor, consegue-se maior penetração nas folhas, ficando disponível maior quantidade do elemento e sendo transportado para os diferentes tecidos da planta (STACEY; OOSTERHUIS, 2007; COLLE; MADDOZ-ESCANDE; LECLERC, 2009).

## 2.5 Rúcula

A rúcula é uma planta da família Brassicaceae, tendo como centro de origem a região do Mediterrâneo e Ásia Ocidental (SOUZA, 2014). No mercado, podem ser encontradas três espécies de rúcula: *Diplotaxis tenuifolia*, *Diplotaxis muralis* e *Eruca sativa*, sendo esta última, a mais consumida no Brasil (FILGUEIRA, 2008). A planta se caracteriza por seu porte baixo, com alturas dentre 20-50 cm, ciclo curto e acelerado crescimento vegetativo. Suas folhas são densas, recortadas e de coloração verde (MORALES; JANICK, 2002).

A rúcula é uma das principais hortaliças folhosas produzidas no Brasil, por possuir alta produtividade e aceitabilidade pelo consumidor, além de apresentar rico conteúdo nutricional, como altos teores de Fe, vitaminas A e C, e proteínas (AMORIM; HENZ; MATTOS, 2007). Segundo Barlas, Irget e Tepecik (2011), *E. sativa* também é conhecida por ter diversas propriedades medicinais, tais como anti-inflamatória, digestiva, emoliente e laxante.

Em termos de produção, vem-se registrando aumentos consideráveis nos volumes comercializados de rúcula desde finais da década de 90, estimando-se uma área cultivada de 6.000 ha ano<sup>-1</sup>, e 85% da produção nacional localizada no sudeste do Brasil (PURQUERIO et al., 2007). Purquerio e Tivelli (2007) relataram que, entre 1997 a 2006, a quantidade comercializada no estado de São Paulo aumentou em

333%. Por sua parte, Cavarianni et al. (2008) informaram incremento de 78% na produção de rúcula em todo o território nacional.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e características da área experimental

O experimento foi conduzido na Unesp, Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, cujas coordenadas geográficas são 21°15'22" Sul e 48°18'58" Oeste, com altitude de 575 metros, no período de 26 de janeiro a 8 de março de 2017. Os valores de temperatura média e de precipitação pluvial referentes ao período de condução do experimento foram obtidos junto à estação meteorológica da FCAV (Figura 1).

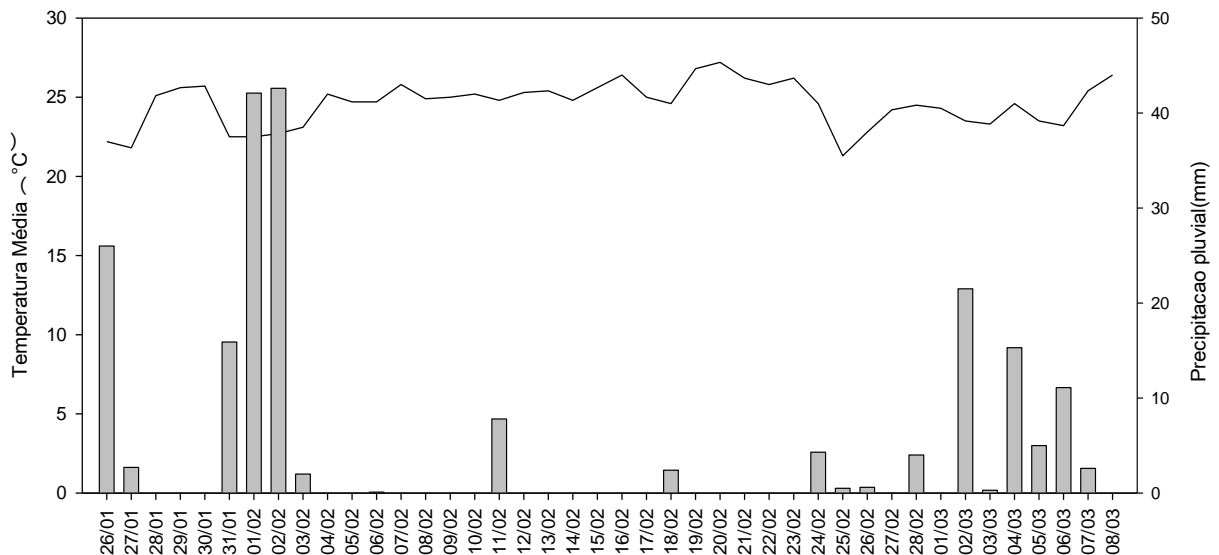


Figura 1: Temperatura média e precipitação pluvial referentes ao período de condução do experimento.

O solo da área, segundo classificação da EMBRAPA (2013), corresponde ao Latossolo Vermelho típico de textura muito argilosa, com 615, 142 e 243 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente, cujas características químicas na camada de 0 a 0,2 m em pré-instalação do experimento foram: pH (CaCl<sub>2</sub>)=5,3; M.O (g dm<sup>-3</sup>)=27; Ca (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=42; Mg (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=15; K (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=5,9; H+Al (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=23; SB (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=63; CTC (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)=86,1; P<sub>resina</sub> (mg dm<sup>-3</sup>)=9; S (mg dm<sup>-3</sup>)=12; B (mg dm<sup>-3</sup>)=0,27; Cu (mg dm<sup>-3</sup>)=6,1; Fe (mg dm<sup>-3</sup>)=22; Mn (mg dm<sup>-3</sup>)=23,1; Zn (mg dm<sup>-3</sup>)=3,1 e V (%)=73.

### 3.2 Tratamentos e delineamento experimental

Foram avaliados 16 tratamentos que corresponderam à combinação dos fatores doses de Zn (0,5; 1 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup>, em pulverização), épocas de aplicação (15 dias após a emergência - DAE, 20 DAE, 25 DAE, 15 e 20 DAE e 15, 20 e 25 DAE), e uma testemunha, equivalente a ausência de aplicação do Zn. Salienta-se que as doses avaliadas de zinco foram baseadas em resultados de Yuri et al. (2006) e Resende; Yuri e Souza (2008) com a cultura da alface. Nos tratamentos que continham duas e três épocas de aplicação, as doses de Zn foram divididas proporcionalmente ao número de épocas, totalizando ao final as quantidades previstas nos tratamentos.

O experimento foi instalado sob delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 x 5 + 1, com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída por doze linhas de 1 m de comprimento, com espaçamento entre si de 0,25 m e 0,05 m entre plantas. Para avaliação de todas as características, foram utilizadas as plantas localizadas em 0,8 metro central das oito linhas centrais, de cada unidade experimental. Como bordadura, foram consideradas as plantas das duas linhas laterais da parcela e os primeiros e últimos 0,1 m das oito linhas centrais.

### 3.3 Instalação e condução do experimento

Antes do plantio, o solo foi preparado com uma aração e duas gradagens e, em seguida, preparados os canteiros. Não foi realizada calagem, visto que a saturação por bases do solo estava em 73%.

Com base na recomendação de Trani et al. (2014), no plantio, foram aplicados 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, na forma de ureia e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, usando como fonte superfosfato simples, e 2 kg ha<sup>-1</sup> de B, como ácido bórico, pulverizado no solo. Não foi aplicado K, uma vez que o teor do nutriente no solo estava muito alto.

A semeadura da rúcula 'Folha larga' foi realizada no dia 26 de janeiro de 2017, diretamente no solo, em sulcos com 0,02 m de profundidade. A emergência ocorreu no dia 1 de fevereiro de 2017 e quando as plântulas apresentaram três

folhas foi realizado o desbaste para estabelecer o espaçamento entre plantas de 0,05 m. A irrigação foi do tipo aspersão. As adubações de cobertura foram feitas com ureia, aplicando  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, parcelado em quantidades iguais aos 7, 14 e 21 DAE.

Para a aplicação das doses de Zn, utilizou-se sulfato de zinco, aplicando-se via foliar, utilizando-se espalhante adesivo Tween®.

A colheita do experimento foi realizada no dia 8 de março de 2017, perfazendo-se, assim, um total de 36 dias da emergência das plântulas.

### 3.4 Características avaliadas

**3.4.1 Quantificação de clorofilas a, b e carotenoides:** os teores ( $\text{mg g}^{-1}$ ) de clorofila a, b e carotenoides foram obtidos a partir de material vegetal armazenado em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ , proveniente de amostras coletadas aos 36 DAE. Os procedimentos laboratoriais foram realizados conforme metodologia de Lichtenthaler (1987).

**3.4.2 Trocas gasosas:** utilizando-se de um analisador de trocas gasosas (IRGA), aos 34 e 35 DAE, foram mensurados a taxa de assimilação de carbono (A), expresso em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; transpiração (E), em  $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e condutância estomática (gs), expressa em  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . As avaliações foram realizadas em folhas do terço médio da planta em duas plantas por parcela durante o período de 10 às 12 horas.

**3.4.3 Massa fresca da parte aérea:** aos 36 DAE, foram colhidas 40 plantas centrais de cada parcela, dentro da área útil, cortando-se o caule rente ao solo. A massa fresca foi expressa em  $\text{g planta}^{-1}$ .

**3.4.4 Altura:** Nas mesmas plantas coletadas para a determinação de massa fresca da parte aérea, foi medida a altura com uma régua milimetricamente graduada, e expressa em centímetros.

**3.4.5 Número de folhas:** Foram contadas o número de folhas por planta nas mesmas plantas do item 3.4.3.

**3.4.6 Área foliar:** para a determinação de área foliar ( $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ), utilizou-se o medidor eletrônico de área foliar Li-Cor 3100.

**3.4.7 Massa seca da parte aérea:** após medir a área foliar, as amostras foram lavadas em água corrente, em solução de detergente neutro ( $3\text{mL L}^{-1}$ ), em solução de  $0,1\text{M}$  de HCl, seguida de lavagem com água deionizada (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar até atingir massa constante.

**3.4.8 Teor de macro e micronutrientes:** a massa seca da parte aérea foi moída, em moinho tipo Wiley, e preparada para análise dos teores de macro (N e P) e micronutrientes (Zn, Fe, Cu e Mn), conforme métodos descritos por Miyazawa et al. (2009).

### **3.5 Análise estatística**

Foi realizada análise de variância dos dados de cada característica, pelo teste F, segundo o delineamento proposto. Realizou-se análise de regressão para doses e para o efeito significativo das épocas, a discriminação das médias se fez pelo teste de Tukey, utilizando-se o software estatístico AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2009).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características fisiológicas

Não se observou efeito da época de aplicação, nem da dose de Zn, nos teores de clorofila *a*, *b* e carotenoides. Os teores de clorofila *a*, *b* e carotenoides situaram-se entre 6,1-7,5; 2,2-2,7 e 1,0-1,3 mg g<sup>-1</sup> matéria fresca, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de F, significâncias, médias e coeficientes de variação dos fatores dose de Zn e época de aplicação sobre os teores de clorofila *a* (*Chl a*), clorofila *b* (*Chl b*) e carotenoides (*Car*); taxa de assimilação de carbono (*A*), transpiração (*E*) e condutância estomática (*gs*).

Causas de variação	<i>Chl a</i> -----mg g <sup>-1</sup> -----	<i>Chl b</i>	<i>Car</i>	<i>A</i> μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	<i>E</i> mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	<i>gs</i> mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Valores de F						
Dose Zn (Zn)	0,09ns	0,19ns	0,48ns	0,11ns	0,47ns	0,43ns
Época (E)	1,43ns	1,17ns	2,20ns	0,49ns	0,81ns	0,28ns
Zn x E	1,59ns	1,30ns	1,77ns	1,01ns	0,61ns	1,09ns
Controle x (Zn x E)	0,70ns	0,70ns	0,95ns	0,21ns	0,07ns	0,37ns
Médias						
Zn (kg ha <sup>-1</sup> )						
0,5	6,8	2,4	1,1	18,1	5,1	0,2
1,0	6,9	2,5	1,2	18,0	5,0	0,2
1,5	6,7	2,4	1,1	18,3	5,2	0,2
Época						
1	7,5	2,7	1,2	18,4	5,0	0,2
2	6,5	2,3	1,1	18,8	5,0	0,2
3	6,1	2,2	1,0	17,9	5,0	0,2
4	6,7	2,3	1,1	18,1	5,3	0,2
5	7,3	2,6	1,3	17,6	5,2	0,3
Controle	6,1	2,1	1,0	17,6	5,0	0,2
CV (%)	25,0	26,9	23,9	12,9	10,6	18,1

(ns) não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*) significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*\*) significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

<sup>1</sup> Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 - 25 DAE, 4- 15 e 20 DAE, 5- 15,20 e 25 DAE.

Os resultados concordam com os obtidos por Urlic, Dumicic e Ban (2014), que avaliaram a resposta de rúcula 'Cultivada' à concentração de Zn (1, 75 e 150  $\mu\text{M}$  Zn), em solução nutritiva, não encontrando efeito nos teores de clorofila *a*, *b* e carotenoides. Em *Brassica juncea*, Khan et al. (2016), estudando a resposta a aplicações foliares de sulfato de zinco, em doses de 3000 e 4000  $\text{mg L}^{-1}$ , não observaram variações nos teores de clorofila *a*, *b* e totais. Diversos estudos relatam diminuição nos teores de clorofilas causada tanto pela deficiência (KAYA; HIGGS, 2001; ROOSTA; ESTAJI; NIKNAM, 2017) quanto pela toxicidade por zinco (ANWAAR et al., 2015). A falta de resposta para essa característica pode ser explicada pelas doses de zinco utilizadas, sugerindo que a maior dose do elemento ( $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ) não foi suficiente para causar degradação de clorofilas e a ausência da aplicação foi compensada pelo alto teor de Zn no solo.

A taxa de assimilação de carbono (*A*), transpiração (*E*) e condutância estomática (*gs*) não foram afetadas pelas doses de Zn, época de aplicação, nem pela interação entre eles (Tabela 1).

Diversos autores mencionaram que aplicações de zinco, via foliar ou ao solo, podem melhorar os parâmetros relacionados com a troca de gases (KHAN; MCDONALD; RENGEL, 2004; QIAO et al., 2013). No entanto, altas doses podem gerar alterações fisiológicas, como baixas taxas de condutância estomática, limitação na síntese de clorofilas e menores conteúdos relativos de água, que favorecem baixas taxas de assimilação de carbono (MATEOS-NARANJO et al., 2008; SAGARDOY et al., 2009; SHI; CAI, 2009). No presente experimento, não se observou efeito dos fatores, concordando com os resultados obtidos por Zhao et al. (2013), que avaliando a resposta fisiológica de *Cucumis sativus* à doses de óxido de zinco aplicado ao solo, não observaram limitações nas taxas de assimilação de carbono, transpiração e condutância estomática com concentrações foliares de Zn de até  $563,9 \text{ mg kg}^{-1}$ .

A ausência de efeito sugere possível compartimentalização do zinco nas células da folha, evitando assim, danos aos processos fisiológicos, fato que já foi verificado por Ozdener e Aydin (2010), em rúcula 'Istambul', com altas concentrações de Zn. Segundo Broadley et al. (2007), espécies da família Brassicaceae podem acumular grandes quantidades de Zn sem sofrer prejuízos na

sua fisiologia, nem na acumulação de massa seca. De fato, plantas hiperacumuladoras de zinco pertencentes à essa família, como *Arabidopsis halleri* e *Thlasi caerulescens*, em ambientes com altas concentrações do nutriente, podem armazená-lo no vacúolo das células do mesofilo, sem observar alterações fisiológicas (LASAT; BAKER; KOCHIAN, 1998; KUPPER et al., 2004).

## 4.2 Crescimento

Altura (ALT), número de folhas (NF), área foliar (AF) e massa fresca da parte aérea (MFPA) não foram influenciadas pelos fatores avaliados. A massa seca da parte aérea (MSPA) foi afetada pela interação dos fatores (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de F, significâncias, médias e coeficientes de variação dos fatores dose de Zn e época de aplicação, sobre as características altura (ALT), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA).

Causas de variação	ALT (cm)	NF (folhas planta <sup>-1</sup> )	AF (cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	MFPA ---- (g planta <sup>-1</sup> ) ----	MSPA
Valores de F					
Dose Zn (Zn)	0,16ns	0,04ns	0,02ns	0,71ns	2,66ns
Época (E)	0,59ns	0,43ns	0,40ns	0,13ns	0,35ns
Zn x E	0,84ns	0,45ns	0,68ns	1,30ns	3,49**
Controle x (Zn x E)	0,86ns	0,72ns	0,47ns	0,87ns	1,16ns
Médias					
Zn (kg ha <sup>-1</sup> )					
0,5	30,8	10,7	567,4	59,6	4,3
1,0	30,6	10,6	565,2	56,9	4,2
1,5	30,9	10,6	568,6	58,6	4,0
Época					
1	30,8	10,9	564,2	58,1	4,2
2	30,6	10,3	569,2	58,1	4,1
3	30,2	10,5	548,5	57,5	4,2
4	31,2	10,7	576,0	58,9	4,1
5	31,2	10,5	577,3	59,3	4,3
Controle	29,9	10,1	589,6	54,9	3,9
CV (%)	6,0	11,6	11,16	12,4	10,7

(ns) não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*) significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*\*) significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

<sup>1</sup> Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 - 25 DAE, 4 - 15 e 20 DAE, 5 - 15, 20 e 25 DAE.

A altura variou de 29,9 a 31,2 cm, valores próximos aos reportados por Rossi et al. (2004), que fazendo a caracterização varietal de cultivares de rúcula, encontraram para 'Folha larga' valores de 35,7 cm. Para número de folhas, os valores estiveram entre 10,1 a 10,9 folhas planta<sup>-1</sup> e a área foliar variou de 548,5 a 589,6 cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>.

Os valores de massa fresca da parte aérea (MFPA) encontraram-se entre 54,9 a 59,6 g planta<sup>-1</sup>, sem se observar efeito das doses de Zn, épocas e da interação dos fatores (Tabela 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Ozdener e Aydin (2010), que avaliando doses de 250 a 2000 µg Zn g<sup>-1</sup> de substrato seco, na rúcula 'Istambul', não encontraram efeito nessa característica. Zhi et al. (2015) estudaram o efeito do zinco na germinação e crescimento inicial da rúcula 'Hubu-14', e observaram que concentrações de 0,2; 0,4 e 1 mM Zn não influenciaram a massa fresca da planta. No entanto, com 3 e 5 mM Zn, foram obtidos aumentos consideráveis. Um estudo semelhante foi realizado por Ozdener e Kutbay (2009), avaliando o efeito de altas concentrações de Zn na germinação e crescimento da raiz e do hipocótilo, relatando pouco efeito do micronutriente nessas variáveis, indicando que a rúcula é uma planta tolerante ao zinco.

Sabe-se que o Zn é um nutriente fortemente relacionado ao crescimento da planta, visto que é necessário para a síntese de ácidos nucleicos, proteínas e carboidratos (LUKASKI, 1995). Porém, plantas de rúcula não fertilizadas com Zn não diferiram de plantas fertilizadas quanto à ALT, NF, AF e MFPA, o que pode ser atribuído ao teor de zinco encontrado no solo (3,1 mg dm<sup>-3</sup>), considerado muito alto por Raij et al. (1997), sendo suficiente para satisfazer o requerimento nutricional da rúcula no micronutriente. Na literatura, vários autores constataram resposta positiva à aplicação de Zn quando este se encontrava em baixa concentração no meio de cultivo. Por outro lado, embora visualizada toxicidade do Zn nas doses de 1 e 1,5 kg ha<sup>-1</sup>, quando aplicadas em dose única, o sintoma caracterizado por pontuações cloróticas desapareceu cerca de uma semana após a pulverização; e, na colheita, não se observou prejuízo ALT, NF, AF e MFPA. Segundo Broadley et al. (2007), espécies da família Brassicaceae podem acumular grandes quantidades de Zn sem sofrer prejuízos na acumulação de massa seca.

Quanto à massa seca da parte aérea, houve efeito da interação dos fatores

(Tabela 2). Os valores de massa seca da parte aérea para aplicações de Zn nas épocas 2 e 4 ajustaram-se à equação de segundo grau, encontrando-se os maiores valores com doses de 0,5 e 1,04 kg ha<sup>-1</sup> Zn, respectivamente, enquanto aplicação na época 3, a massa seca das plantas ajustou-se linearmente às doses de Zn. Para as pulverizações feitas nas épocas 1 e 5 não se encontraram ajustes de equação (Figura 2). Fageria (2002), avaliando doses de Zn no solo, em feijão, relataram resultados semelhantes, não encontrando efeito das doses. Barrameda-Medina et al. (2014), trabalhando com *Brassica oleracea* e *Lactuca sativa*, em hidroponia, e duas concentrações de zinco (0 e 0,5nM Zn), relataram reduções na massa seca de 13 e 32% com aplicação de Zn, respectivamente. Porém, a redução observada para *B. oleracea* não era significativa em relação à ausência de aplicação de Zn. Segundo Broadley et al. (2007) e Barrameda-Medina et al. (2017), espécies da família Brassicaceae parecem ser pouco sensíveis a doses altas de Zn, em comparação a outras famílias.

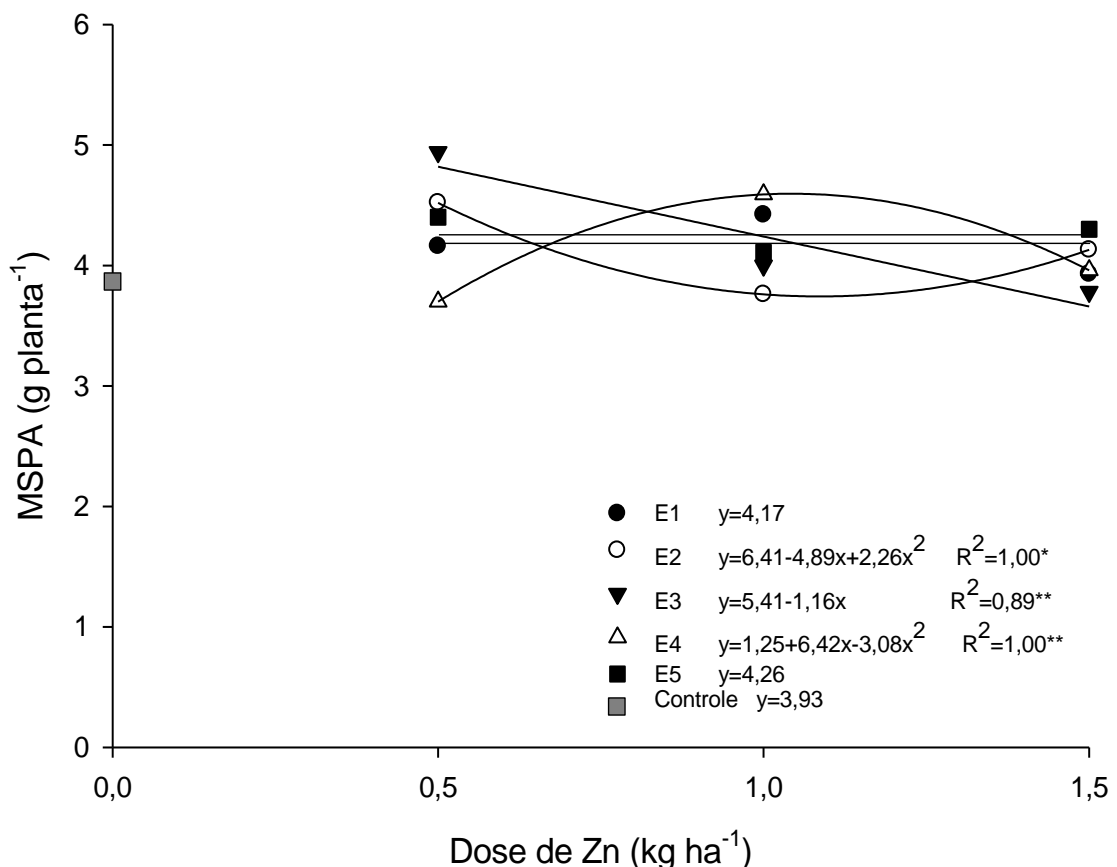


Figura 2. Massa seca da parte aérea (MSPA) de rúcula 'Folha Larga' em função da interação dose e época de aplicação de Zn. Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 - 25 DAE, 4 - 15 e 20 DAE, 5 - 15, 20 e 25 DAE.

### 4.3 Estado nutricional e biofortificação

Houve efeito da interação dos fatores no teor de nitrogênio. Também foi verificado diferença entre plantas não fertilizadas com Zn ( $41,7 \text{ g kg}^{-1}$ ) e as que receberam o micronutriente ( $46,1 \text{ g kg}^{-1}$ ). O fator época de aplicação de Zn não afetou o teor de N foliar (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de F, significâncias, médias e coeficientes de variação dos fatores dose de Zn e época de aplicação sobre os teores de N, P, Fe, Cu, Mn e Zn.

Causas de variação	N -----g kg <sup>-1</sup> -----	P	Cu	Mn	Fe	Zn
Valores de F						
Dose Zn (Zn)	3,40*	3,15ns	1,83ns	3,96*	0,25ns	52,97**
Época (E)	0,34ns	1,64ns	0,22ns	0,63ns	1,15ns	177,39**
Zn x E	3,51*	0,90ns	0,76ns	1,13ns	0,37ns	15,24**
Controle x (Zn x E)	5,13*	3,53ns	0,31ns	0,20ns	3,48ns	38,19**
Médias						
Zn (kg ha <sup>-1</sup> )						
0,5	46,1	3,9	7,0	39,3	615,8	85,2
1,0	45,4	3,9	7,3	37,0	636,0	109,1
1,5	43,8	4,1	7,5	35,6	643,8	128,7
Época						
1	44,8	4,1	7,3	38,3	688,9	69,2 c
2	45,4	4,0	7,4	37,5	627,2	84,2 c
3	45,8	3,9	7,4	38,0	639,8	194,3 a
4	44,9	3,9	7,1	36,4	627,7	76,5 c
5	44,6	4,0	7,2	36,1	575,1	114,2 b
Controle	41,7	4,3	7,5	38,2	757,8	65,0
CV (%)	6,7	7,1	12,1	11,3	20,5	12,7

(ns) não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*) significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; (\*\*) significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

<sup>1</sup> Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 - 25 DAE, 4 - 15 e 20 DAE, 5 - 15, 20 e 25 DAE.

De acordo com a interação dose e épocas de aplicação de Zn, os teores foliares de N na época 1 ajustaram-se ao modelo quadrático, com os teores de N na folha de rúcula atingindo o máximo de  $48,8 \text{ g kg}^{-1}$ , com a dose de  $1,07 \text{ kg ha}^{-1}$  de Zn. Para épocas 2 e 3, os teores foliares de N ajustaram-se linearmente às doses de Zn, encontrando maiores valores com a dose de  $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de Zn, para ambos casos. Para as épocas 4 e 5, não se encontraram ajustes de equação (Figura 3).

Segundo Broadley et al. (2007), o zinco está ligado ao metabolismo do N na planta, já que está correlacionado com a atividade da Nitrato redutase (NR), além de ser constituinte dos ribossomas e da RNA polimerase (MARSCHNER, 2012). Diversos estudos têm mostrado que devido à deficiência ou toxicidade de Zn, ocorre inibição da NR, ocasionando diminuição na concentração de N (SEETHAMBARAM; DAS, 1986; LUNA; CASANO; TRIPPI, 2000); ademais de reduzir a incorporação de N nos aminoácidos e proteínas (SUTTER; JUNG; KRAUSS, 2002). Barrameda-Medina et al. (2016), estudando a biofortificação com zinco em *Lactuca sativa* L. em hidroponia, encontraram que a dose de Zn com a qual se obtinha maior atividade da enzima NR (100 µM de Zn), correspondia à mesma dose onde se apresentavam teores foliares mais altos de N.

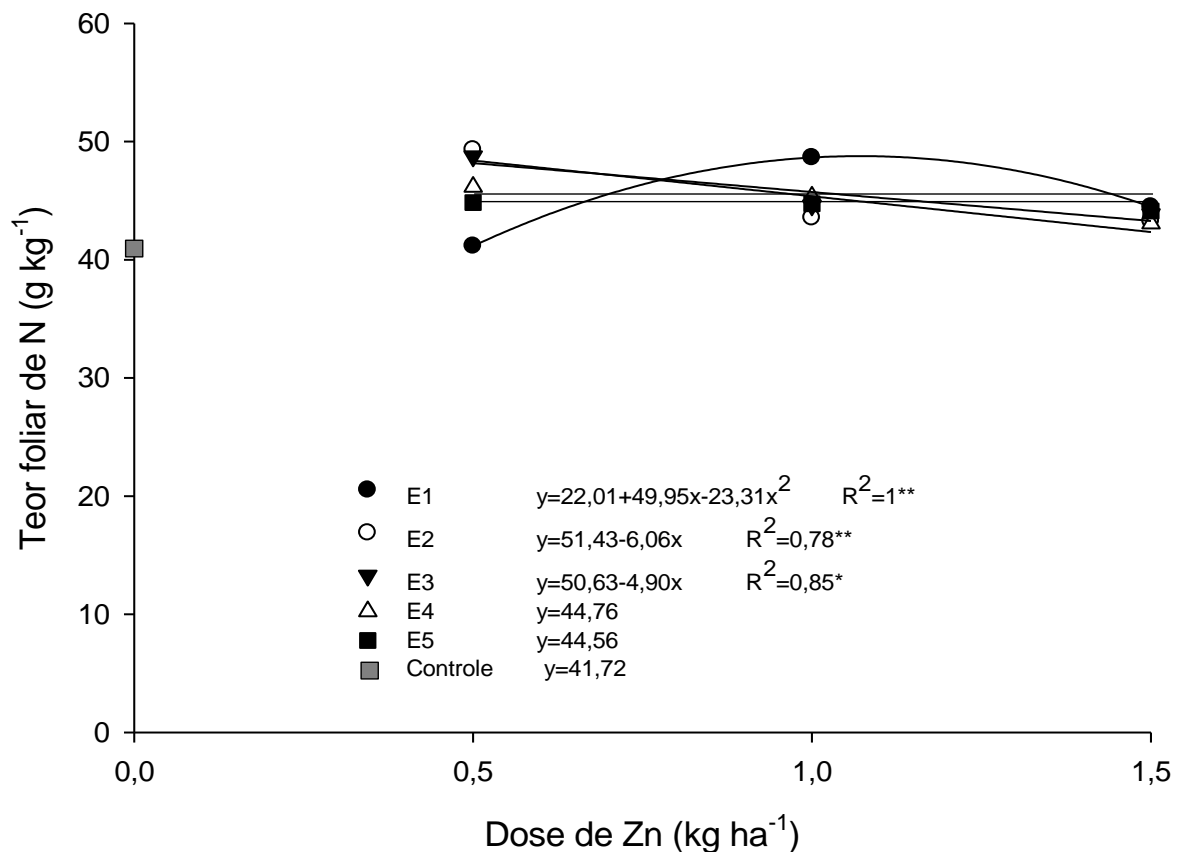


Figura 3. Teor foliar de N em rúcula 'Folha Larga' em função da interação dose e época de aplicação de Zn. Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 - 25 DAE, 4- 15 e 20 DAE, 5- 15,20 e 25 DAE.

Os teores foliares de fósforo estiveram entre 3,9 a 4,3 g kg<sup>-1</sup>, não se encontrando diferenças entre os tratamentos com aplicação de zinco e o controle (Tabela 3). Em resposta às doses de Zn, os teores de P se ajustaram a uma equação linear crescente, atingindo maior teor com a dose de 1,5 kg ha<sup>-1</sup> do micronutriente (Figura 4).

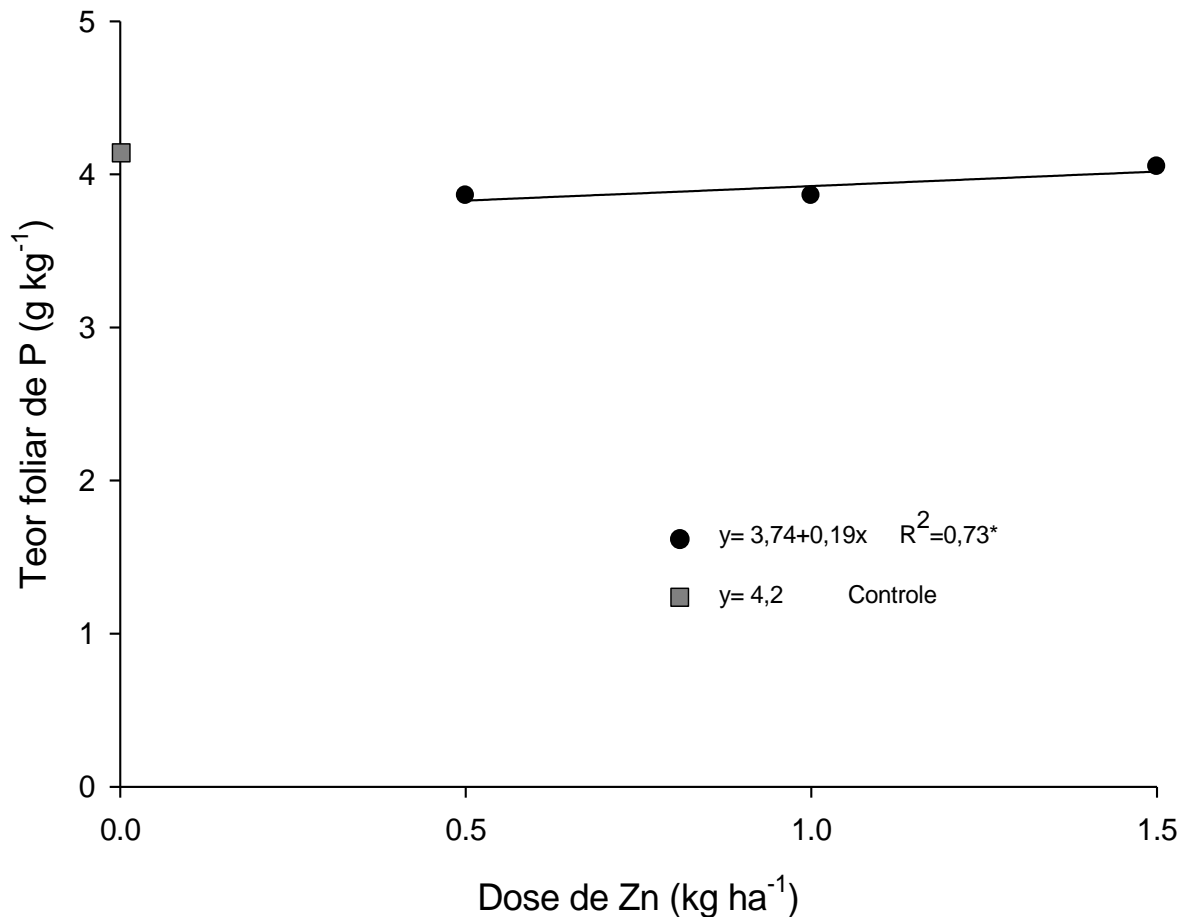


Figura 4. Teor foliar de P em rúcula ‘Folha Larga’ em função da dose de Zn aplicada.

Diversos estudos têm avaliado a interação Zn-P, obtendo resultados contrastantes. Os resultados ora obtidos divergem dos encontrados por Singh e Bhatt (2013), que pesquisando o efeito de aplicações foliares de zinco em *Lens culinaris*, encontraram redução no teor foliar de P, atribuindo como consequência, possivelmente, do antagonismo entre os dois nutrientes. Não obstante, essa interação pode estar condicionada pela espécie estudada (FAGERIA, 2002).



Destaca-se que maiores teores foliares de P em função das doses de Zn aplicadas pode sugerir um mecanismo de detoxificação devido a altas concentrações de zinco na folha de rúcula. Em *Eruca vesicaria* L., espécie do mesmo gênero da rúcula, estudando a tolerância, distribuição e especiação do Zn nos diferentes órgãos da planta (raiz, pecíolo e folha), Terzano et al. (2008) encontraram que do total de zinco acumulado nas folhas, 50% estava na forma de fosfatos precipitados e a outra metade ligada a aminoácidos como histidina e cisteína. Zhao, Shen e McGrath (1998) observaram que na espécie hiperacumuladora de zinco *Thlaspi caerulescens*, pertencente à família Brassicaceae, os teores foliares de P aumentavam à medida que aumentava o teor foliar de Zn até o valor de 8.900 mg kg<sup>-1</sup> Zn, sugerindo que a alta correlação entre os dois elementos podia ser devido a um mecanismo para minorar o estresse oxidativo, ao precipitar o fosfato inorgânico com o Zn. Na mesma família, em *Arabidopsis halleri*, também hiperacumuladora, Sarret et al. (2009) encontraram que altas proporções de Zn na parte aérea estavam complexadas a grupos fosfato.

Não foi verificado efeito das doses de Zn aplicadas, épocas e da interação entre os dois fatores sobre o teor de Cu foliar (Tabela 3). Diversos autores têm relatado baixa relação entre teores de Cu e doses de Zn aplicadas (FAGERIA, 2002; MAO et al., 2014). Lima, Nascimento e Sousa (2015), trabalhando com cenoura, quiabo e couve, e doses crescentes de Zn aplicadas ao solo, não observaram efeito do Zn sobre os teores foliares de Cu. Os teores foliares de Cu estiveram entre 7,0 a 7,5 mg kg<sup>-1</sup>, sendo próximos aos encontrados por Barlas, Irget e Tepecik (2011), também em rúcula.

Com o aumento do fornecimento de zinco, verificou-se diminuição linear nos teores foliares de manganês (Figura 5), encontrando-se maior teor de Mn com a dose de 0,5 kg ha<sup>-1</sup> de zinco. Os teores de foliares de Mn estiveram entre 35,6 e 39,3 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3), concordando com os valores obtidos por Barlas, Irget e Tepecik (2011), que fazendo a caracterização nutricional de rúcula convencional, verificaram valores de 40,6 mg kg<sup>-1</sup> de Mn.

Em milho, Adiloglu e Adiloglu (2006) relataram incremento na absorção e translocação de Mn como consequência de altas doses de Zn, porém, o efeito do zinco sobre Mn ainda não está bem elucidado e pode variar entre espécies (LIMA;

NASCIMENTO; SOUSA, 2015). No presente experimento se encontrou possível antagonismo entre Zn e Mn, resultado semelhante aos relatados por Fageria (2002) e Imtiaz et al. (2003), em arroz e trigo, respectivamente. Em *Punica granatum* L., Hasani et al. (2012), avaliando o efeito de aplicações foliares de sulfato de zinco, verificaram menores concentrações foliares de Mn com a maior dose de zinco.

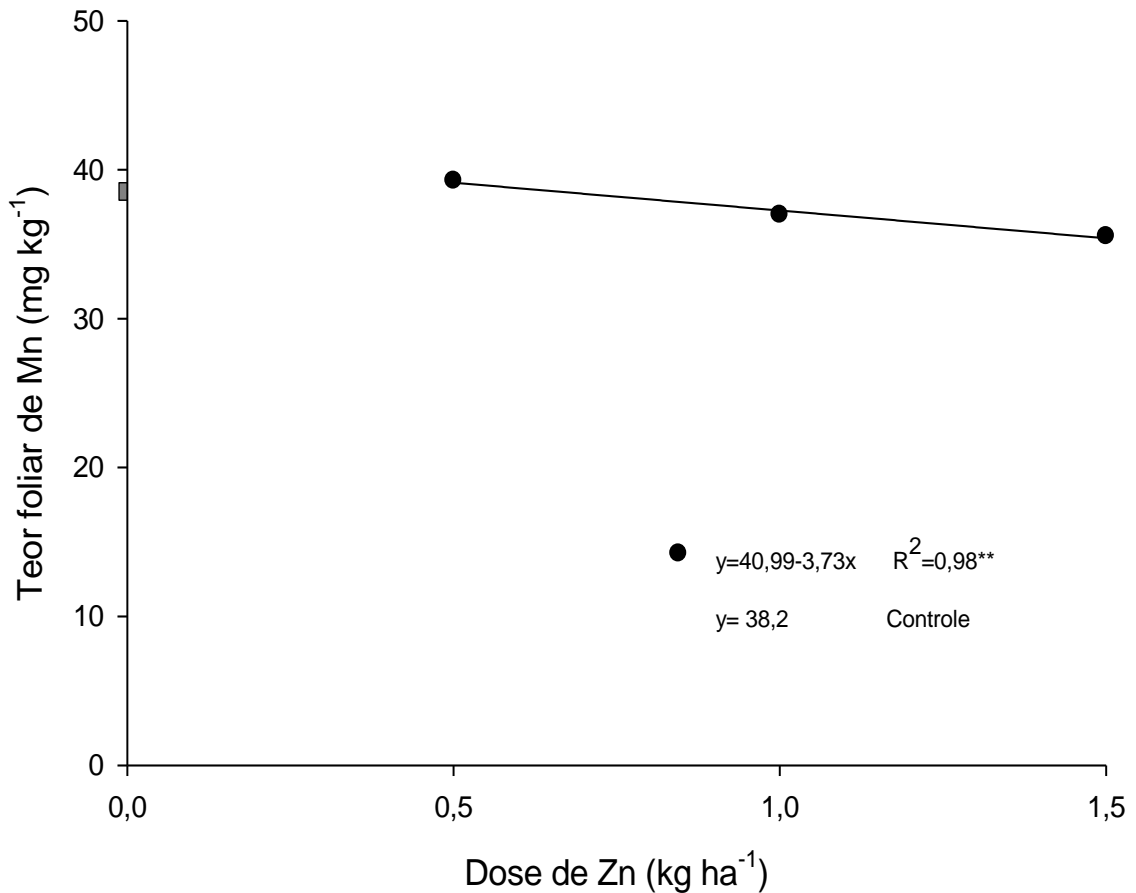


Figura 5. Teor foliar de Mn em rúcula ‘Folha Larga’ em função da dose de Zn aplicada.

Não foi verificado efeito das doses de Zn aplicadas, épocas nem da interação dos fatores sobre os teores de Fe (Tabela 3), encontrando-se próximos aos valores relatados por Barlas et al. (2011).

Segundo Zhao et al. (2012), pode existir antagonismo entre Zn e Fe, devido a desordens no processo de quelatação nas raízes, assim como competição na entrada das células do xilema. Ambler, Brown e Gauch (1970) encontraram que em plantas de soja o Zn diminuía a translocação do Fe, efeito descrito também por Safaya e Gupta (1979) em milho. No entanto, a ausência de efeito do Zn no teor foliar de ferro, obtido no presente experimento, concorda com diversos estudos feitos

em espécies de Brassicaceae. Lima, Nascimento e Sousa (2015) em couve, verificaram que doses de Zn de 50, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> não influenciaram os teores de Fe em caule, raiz e folhas. Wu et al. (2007), estudando a tolerância de 158 materiais de *Brassica rapa* L. à altas concentrações de Zn, relataram baixa correlação entre os teores foliares de ferro e zinco, em plantas moderadamente e altamente tolerantes ao micronutriente. Barlas, Irget e Tepecik (2011), realizando a caracterização nutricional de 30 amostras de rúcula, provenientes de diferentes locais, não verificaram correlação entre os teores de zinco e ferro em folha.

Para os teores de Zn, houve efeito dos fatores isolados, da interação, assim como diferença entre plantas que receberam e não receberam fertilização com o micronutriente (Tabela 3). Barrameda-Medina et al. (2014), em *Brassica oleracea*, relataram incremento na concentração de zinco foliar próximo a 500% ao comparar plantas com e sem aplicação de sulfato de zinco.

Com relação à interação dos fatores, os teores foliares de Zn nas épocas 3 e 5 ajustaram-se a uma equação quadrática, enquanto nas épocas 1, 2 e 4 não se encontraram ajustes à equação polinomial dos teores em função das doses de Zn. Teores mais altos foram observados quando a pulverização foi realizada na época 3, seguida pela 5, utilizando uma dose 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de Zn. Nas épocas 3 e 5, os teores foliares foram 246,5 e 153,5 mg kg<sup>-1</sup>, o que representa incrementos na concentração foliar de zinco de 279% e 136%, respectivamente, em relação ao controle (Figura 6).

A diferença entre épocas pode ser atribuída ao fato de que nas épocas 3 e 5 foi realizada pulverização mais tardia, aos 25 DAE, o que segundo Chaves et al. (2010), na rúcula 'Folha larga', corresponde ao período em que ocorre maior acúmulo de massa fresca e crescimento de área foliar (21 a 35 DAE). Du et al. (2015), em tomate em estádios iniciais de crescimento, fizeram pulverizações de zinco durante três semanas. Os autores encontraram que o teor e a porcentagem absorvida de Zn do total aplicado aumentavam quando se faziam aplicações na terceira semana, coincidindo com o maior valor de massa fresca da parte aérea entre as épocas. Kraemer, Hunsche e Noga (2009) descrevem que a absorção foliar de nutrientes pode ser melhorada com o incremento na superfície foliar, já que aumenta a área de contato, corroborando os resultados encontrados no presente experimento.

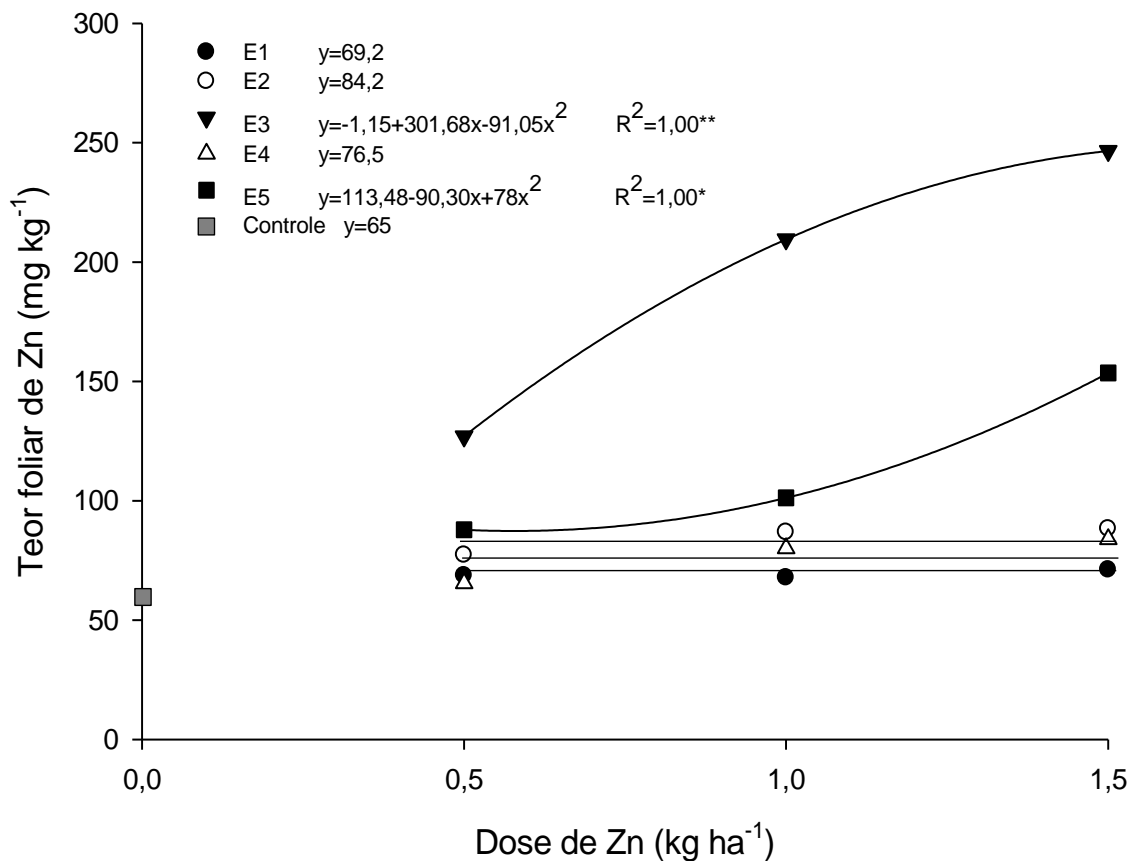


Figura 6. Teor foliar de Zn na massa seca de rúcula ‘Folha Larga’ em função da interação dose e época de aplicação de Zn. Épocas: 1 - 15 dias após a emergência (DAE), 2 - 20 DAE, 3 – 25 DAE, 4- 15 e 20 DAE, 5- 15,20 e 25 DAE.

Os teores no presente estudo são menores aos relatados por Urlic, Dumicic e Goreta Ban (2014), que trabalhando em rúcula cultivar ‘Cultivada’ em hidroponia, encontraram teores foliares de Zn de 153,2; 626,5 e 864,1 mg kg<sup>-1</sup>, com doses de 1; 75 e 150 µM Zn, respectivamente, sem observar redução da massa seca. Ozdener e Aydin (2010), na rúcula ‘Istambul’, avaliando concentrações de 0; 250; 500; 1000 e 2000 µg g<sup>-1</sup> Zn, encontraram teores foliares de 8, 24, 147, 157 e 251 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, respectivamente, sem observar toxicidade e reduções na massa seca e fresca da raiz e da parte aérea.

Segundo White e Brown (2010), a grande maioria de culturas apresentam redução no crescimento com concentrações foliares superiores a 100 mg kg<sup>-1</sup> de Zn. Em hortaliças folhosas como alface e espinafre, teores foliares acima de 218 e 136 mg kg<sup>-1</sup> Zn, respectivamente, podem causar diminuição na massa seca da raiz e da parte aérea (BARRAMEDA-MEDINA et al., 2014; SEEMA et al., 2017). Os resultados encontrados no presente estudo reforçam a hipótese mencionada por Ozdener e

Kutbay (2009) e Zhi et al. (2015) de que a *Eruca sativa* é altamente tolerante ao Zn, sendo uma hortaliça de folha com alta potencialidade para estudos de biofortificação agrônômica com zinco.

Segundo Barrameda-Medina et al. (2017), a biomassa da parte aérea pode ser utilizada como indicador para selecionar a dose de Zn em estudos de biofortificação, para uma cultura específica. Destaca-se que as doses de Zn avaliadas nas diferentes épocas não causaram diminuições na ALT, NF, AF e MFPA, apesar do solo apresentar um teor de Zn de  $3,1 \text{ mg dm}^{-3}$ , considerado por Raj et al. (1997) como muito alto. Assim, que todas as doses do micronutriente podem ser consideradas adequadas para biofortificação, e não representam uma limitação para o crescimento de rúcula 'Folha larga'.

Considerando a demanda de 11 mg por adulto por dia (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, 2016), de acordo com os resultados observados na Figura 6, maior teor foliar de Zn na massa seca da rúcula ( $246,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi obtido com a aplicação de  $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$  do nutriente na terceira época, aos 25 DAE. Admitindo-se 5% de massa seca na rúcula (95% de água), o maior teor de Zn foliar ( $246,5 \text{ mg kg}^{-1}$  na massa seca), obtido com a aplicação de  $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$  do nutriente na terceira época, aos 25 DAE, equivale a  $12,3 \text{ mg kg}^{-1}$  de massa fresca, enquanto plantas que não receberam Zn foliar apresentaram  $3,2 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn na massa fresca de rúcula. Assim, constata-se que a prática agrônômica de fertilização foliar possibilitou enriquecimento da hortaliça em 284%, sem prejuízo na produtividade da cultura. Consequentemente, a pessoa ao consumir 894 g de rúcula *in natura* atenderia à sua demanda diária de Zn, enquanto necessitaria de 3.438 g de rúcula fresca.

## 5 CONCLUSÕES

Fertilização foliar com até 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de zinco, sulfato de zinco, ainda que em solo com alto teor do micronutriente, não afeta os parâmetros fisiológicos e biomassa da rúcula 'Folha larga'.

Há interação entre doses e épocas de aplicação sobre teores de nutrientes e biofortificação da rúcula.

A aplicação foliar de 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de zinco, como sulfato de zinco, aos 25 dias após a emergência, não prejudica a produtividade da cultura e possibilita aumento de 284% na oferta do micronutriente ao homem, para uma mesma quantidade de rúcula consumida.

A rúcula é uma espécie adequada para biofortificação com zinco.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABBAS, G.; KHAN, M. Q.; JAMIL, M.; TAHIR, M.; HUSSAIN, F. Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) as affected by zinc application rates. **International Journal of Agricultural & Biology**, Islamabad, v. 11, n. 4, p. 389–396, 2009.
- ADILOGLU, A.; ADILOGLU, S. The effect of boron (B) application on the growth and nutrient contents of maize in zinc deficient soils. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, Sofia, v. 12, p. 387-392, 2006.
- ALVES, C. Z.; SÁ, M. E. Avaliação do vigor de sementes de rúcula pelo teste de lixiviação de potássio. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 108-116, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0101-31222010000200013>>
- AMBLER, J. E.; BROWN, J. C.; GAUCH, H. G. Effect of zinc on translocation of iron in soybean plant. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 46, n. 2, p. 320-323, 1970.
- 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.
- ANWAAR, S. A.; ALI, S.; ALI, S.; ISHAQUE, W.; FARID, M.; FAROOQ, M. A.; NAJEEB, U.; ABBAS, F.; SHARIF, M. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. **Environmental Science and Pollution Research**, Landsberg, v. 22, n. 5, p. 3441-3450, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3938-9>>
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. Software AgroEstat - Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal (SP): Universidade Estadual Paulista, 2009.
- BARLAS, N. T.; IRGET, M. E.; TEPECIK, M. Mineral contents of the rocket plant (*Eruca sativa*). **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 10, n. 64, p. 14080-14082, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5897/AJB11.2171>>
- BARRAMEDA-MEDINA, Y.; MONTESINOS-PEREIRA, D.; ROMERO, L.; RUIZ, J.; BLASCO, B. Comparative study of the toxic effect of Zn in *Lactuca sativa* and *Brassica oleracea* plants: I. Growth, distribution, and accumulation of Zn, and metabolism of carboxylates. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 107, p. 98–104, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.012>>

BARRAMEDA-MEDINA, Y.; LENTINI, M.; ESPOSITO, S.; RUIZ, J. M.; BLASCO, B. Zn-biofortification enhanced nitrogen metabolism and photorespiration process in Green leafy vegetable *Lactuca sativa* L. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 97, n. 6, p. 1828-1836, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7983>>

BARRAMEDA-MEDINA, Y.; BLASCO, B.; LENTINI, M.; ESPOSITO, S.; BAENAS, N.; MORENO, D. A.; RUIZ, J. M. Zinc biofortification improves phytochemicals and amino-acidic profile in *Brassica oleracea* cv. Bronco. **Plant Science**, Shannon, v. 258, p. 258:45-51, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.02.004>>

BERTINI, I.; ROSATA, A. From genes to metalloproteins: a bioinformatic approach. **European Journal Inorganic Chemistry**, Weinheim, v. 18, n. 1, p. 2546-2555, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/ejic.200700186>>

BONIERBALE, M.; BURGOS, G.; AMOROS, W.; SALAS, E.; SCURRAH, M.; HAAN, S.; ZUM T. Progress and prospects for potato biofortification: Diversity, retention, breeding, and delivery. In: IV Reunión de Biofortificación, 2011, Teresina. **Resúmenes**. 2011. p. 5.

BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P.; ZELKO, I.; LUX, A. Zinc in plants. **New Phytologist**, London, v. 173, n. 4, p. 677-702, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>>

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 2012. p. 191-248.

BROWN, P. H.; CAKMAK, I.; ZHANG, Q. **Form and function of zinc in plants**. In: Robson, A. D. (Ed). *Zinc in Soils and Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 90-106, 1993.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. **Plant and Soil**, Oklahoma, v. 302, n. 1, p. 1-17, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>>

CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A.; AYDIN, N.; WANG, Y.; ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W. J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, n. 16, p. 9092-9102, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/jf101197h>>

CAKMAK, I.; PFEIFFER, W. H.; MCCLAFFERTY, B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron. **Cereal Chemistry Journal**, San Diego, v. 87, n. 1, p. 10-20, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-1-0010>>



CAMBROLLÉ, J.; MANCILLA-LEYTÓN, J.; MUÑOZ-VALLÉS, S.; LUQUE, T.; FIGUEROA, M. Zinc tolerance and accumulation in the salt-marsh shrub *Halimione portulacoides*. **Chemosphere**, Oxford, v. 86, n. 9, p. 867–874, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.039>>

CARVALHO, S. M.; VASCONCELOS, M.W. Producing more with less: Strategies and novel Technologies for plant-based food biofortification. **Food Research International**, Burlington, v. 53, n. 1, p. 961-971, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.021>>

CAVARIANNI R. L.; FILHO, A. B. C.; 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, n. 6, p. 652-658, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162008000600013>>

CENTRO INTERNACIONAL DE LA PAPA (CIP). **La biofortificación con hierro aumenta popularidad de la papa en las comunidades pobres**. Lima: Informe anual 2010. 124 p.

CHAVES, A. M.; GUISTEM, J. M.; FIGUEIREDO, R.T.; ROZALINO, A. J.; SILVA, A. G.; PAIVA, J. B.; SANTOS, F. N. Avaliação de algumas características de crescimento em rúcula. **Horticultura Brasileira**, Vitoria da Conquista, v. 28, n. 2, p. 898-904, 2010.

CLEMENS, S. Zn – a versatile player in plant cell biology. In: HELL, R; MENDEL, R. **Plant Cell Monographs 17, Cell Biology of Metals and Nutrients**. Berlin: Springer, 2010. p. 281–298.

COLLE, C.; MADOZ-ESCANDE, C.; LECLERC, E. Foliar transfer into the biosphere: review of translocation factors to cereal grains. **Journal of Environmental Radioactivity**, Barking, v. 100, n. 9, p. 683–689, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.10.002>>

CUNHA, K. P.; NASCIMENTO, C. W.; PIMENTEL, R. M.; ACCIOLY, A. M.; SILVA, A. J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1319-1328, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300039>>

CURIE, C.; CASSIN, G.; COUCH, D.; DIVOL, F.; HIGUCHI, K.; LE JEAN, M.; MISSON, J.; SCHIKORA, A.; CZERNIC, P.; MARI, S. Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, n. 1, p. 1–11, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcn207>>

DU, Y.; LI, P.; NGUYEN, A. V.; XU, Z. P.; MULLIGAN, D.; HUANG, L. Zinc uptake and distribution in tomato plants in response to foliar supply of Zn hydroxide-nitrate nanocrystal suspension with controlled Zn solubility. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Landau, v. 178, n. 5, p. 722-731, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201400213>>

EHSAN, S.; ALI, S.; NOUREEN, S.; FARID, M.; SHAKOOR, M. B.; ASLAM, A.; BHARWANA, S. A.; TAUQEER, H. M. Comparative assessment of different heavy metals in urban soil and vegetables irrigated with sewage/industrial waste water. **Ecoterra**, Kolozvár, v. 35, n. 1, p. 37–53, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. p. 353.

FAGERIA, N. K. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1765-1772, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200013>>

FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. Boca Raton, FL: CRC Press. 2009. p. 105.

FANG, Y.; WANG, L.; XIN, Z.; ZHAO, L. Y.; AN, X. X.; HU, Q. H. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 6, p. 2079–2084, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/jf800150z>>

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa. UFV. 2008. 421 p.

FURLANI, A. M. Nutrição Mineral. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2004. p. 40-75.

GIBSON, R. S. Zinc: the missing link in combating micronutriente malnutrition in developing countries. **Proceeding of the Nutrition Society**, London, v. 65, n. 1, p. 51-60, 2006.

GIBSON, R. S.; HESS, S. Y.; BROWN, K. H. Indicators of zinc status at the population level: a review of the evidence. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 99, n. 3, p. 14-22, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/S0007114508006818>>

GRAHAM, R.; SENADHIRA, D.; BEEBE, S.; IGLESIAS, C.; MONASTERIO, I. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 57–80, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00133-6)>

GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M.; SAUNDERS, D. A.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; BOUIS, H. E.; BONIERBALE, M.; DE HAAN, S.; BURGOS, G.; THIELE, G.; LIRIA, R.; MEISNER, C. A.; BEEBER, S. E.; POTTS, M. J.; KADIAN, M.; HOBBS, P. R.; GUPTA, R. K.; TWOMLOW, S. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 92, p. 1-74, 2007. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92001-9)>

GUEDES, E. M. S. **Avaliação de fontes, absorção foliar e translocação de zinco (<sup>68</sup>Zn) em laranjeiras**. 2012. 80 f. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas)-Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba, 2012.

HAN, X.; LI, X.; UREN, N.; TANG, C. Zinc fractions and availability to soybeans in representative soils of Northeast China. **Journal of Soils and Sediments**, Berlin, v. 11, n. 4, p. 596-506, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11368-011-0336-5>>

HASANI, M.; ZAMANI, Z.; SAVAGHEBI, G.; FATAHI, R. Effects of zinc and manganese as foliar spray on pomegranate yield, fruit quality and leaf minerals. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 12, n. 3, p. 471-480, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000009>>

HOTZ, C.; BROWN, K. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. **Food and Nutrition**, Tokyo, v. 25, n. 1, p.91–204, 2004.

IMTIAZ, M.; ALLOWAY, B. J.; SHAH, K. H.; SIDDIQUI, S. H.; MEMON, M. Y.; ASLAM, M.; KHAN, P. Zinc nutrition of wheat: II: interaction of zinc with other trace elements. **Asian Journal of Plant Science**, Bholakpur, v. 2, n. 2, p. 156-150, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3923/ajps.2003.156.160>>

INOCÊNCIO, M. F. **Frações de zinco no solo e biofortificação agrônômica com selênio, ferro e zinco em soja e trigo**. 2014. 89 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationship between zinc nutrition, growth parameters, and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1081/PLN-100106016>>

KHAN, H. R.; MCDONALD, G. K.; RENGEL, Z. Zinc fertilization and water stress affects plant water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 267, n. 2, p. 271-284, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-005-0120-7>>

KHAN, R.; GUL, S.; HAMAYUN, M.; SHAH, M.; SAYYED, A.; BEGUM, H.; GUL, H. Effect of foliar application of zinc and manganese on growth and some biochemical constituents of *Brassica juncea* grown under water stress. **American-Eurasian**

**Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, *Dubai*, v. 16, n. 5, p. 984-997, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2016.16.5.12923>>

KHOSHGOFTARMANESH, A. H.; SCHULIN, R.; CHANEY, R. L.; DANESHBAKHSH, B.; AFYUNI, M. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 30, n. 1, p. 83-107, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/agro/2009017>>

KRAEMER, T.; HUNSCHE, M.; NOGA, G. Cuticular calcium penetration is directly related to the area covered by calcium within droplet spread area. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 201-206, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.10.015>>

KUPPER, H.; MIJOVILOVICH, A.; MEYER-KLAUCKE, W.; KRONECK, P. M. Tissue and age dependent differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/ zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype) revealed by X-ray absorption spectroscopy. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 134, n. 2, p. 748-757, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.103.032953>>

KUTMAN, U. B.; YILDIZ, B.; CAKMAK, I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat. **Journal of Cereal Science**, New Delhi, v. 53, n. 1, p. 118–125, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.10.006>>

LASAT, M. M.; BAKER, A. J.; KOCHIAN, L. V. Altered Zn compartmentation in the root symplasm and stimulated Zn absorption into the leaf as mechanism involved in Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 118, n. 3, p. 875-883, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.118.3.875>>

LAURETT, L. **Cultivo hidropônico de alface e rúcula com diferentes concentrações de ferro visando a biofortificação**. 2015. 59f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Espírito Santo, São Mateus, 2015.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigment photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, New York, v. 148, p. 350-382, 1987. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)>

LIMA, I. A.; MARTINEZ, H. E. P.; ZABINI, A. V.; FONTE, P. C. R. Translocação e compartimentalização de Zn aplicado via ZnSO<sub>4</sub> e Zn EDTA nas folhas de cafeeiro e feijoeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 332-339, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000200013>>

LIMA, F. S.; NASCIMENTO, C. W.; SOUSA, C. S. Zinc fertilization as an alternative to increase the concentration of micronutrient in edible parts of vegetables. **Agrária-Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 3, p. 403-408, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5039/agraria.v10i3a5132>>

LOPES, A. S. **Micronutrientes, filosofias de aplicação e eficiência agrônômica**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1999, p. 70.

LOPES, A.S.; GUILHERME, G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. *Advances in Agronomy*, Newark, v. 137, p. 1-72, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.004>>

LUNA, C. M.; CASANO, L. M.; TRIPPI, V. S. Inhibition of wheat nitrate reductase activity by zinc. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 43, n. 2, p. 257-262, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1002760412055>>

LUKASKI, H. C. Micronutrients (magnesium, zinc, and copper): are mineral supplements needed for athletes? **International Journal of Sport Nutrition**, London, v. 5, n. 1, p. 74-83, 1995.

LYONS, G.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; STANGOULIS, J.; GRAHAM, R. Selenium concentration in wheat grain: Is there sufficient genotypic variation to use in breeding?. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n. 1, p. 369-380, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-004-0909-9>>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MAO, H.; WANG, J.; WANG, Z.; ZANG, Y.; LYONS, G.; ZOU, C. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Santiago, v. 14, n. 2, p. 459-470, 2014.

MARSCHNER, P. M. In: \_\_\_\_\_. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. London: Elsevier, 2012. p. 672.

MATEOS-NARANJO, E.; REDONDO-GÓMEZ, S.; CAMBROLLÉ, J.; LUQUE, T.; FIGUEROA, M. E. Growth and photosynthetic responses to zinc stress of an invasive cordgrass, *Spartina densiflora*. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 10, n. 6, p. 754-762, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00098.x>>

MATSUZAKI, R. T. **Quelatos de ferro afetam o crescimento e a produção de rúcula cultivada em sistema hidropônico**. 2013. 66f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

MONSANT, A. C.; WANG, Y.; TANG, C. Nitrate nutrition enhances zinc hyperaccumulation in *Noccaea caerulescens* (Prayon). **Plant and Soil**, The Hague, v. 336, n. 1, p. 391-404, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0490-3>>

MORALES, M.; JANICK, J. **Arugula: a promising specialty leaf vegetable**. Reprinted from: Trends in new crops and new uses. 2002. Disponível em: <https://www.hort.purdue.edu/newcrop/ncnu02/v5-418.html>. Acesso em: 05 março. 2015.

MUTHAYYA, S.; RAH, J. H.; SUGIMOTO, J. D. ROOS, F.; KRAEMER, K.; BLACK, R. The global hidden hunger indices and maps: an advocacy tool for action. **PLoS One**, Cincinnati, v. 8, n. 6, p. 1-12, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067860>>

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MURAOKA, T.; CARMO, C.A.F.S.; MELO, W.J. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2009, p. 191-233.

NASRI, M.; KHALATBARI, M.; FARAHANI, H. A. Zn-foliar application influence on quality and quantity features *in phaseolous vulgaris* under different levels of N and K fertilizers. **Advances in Environmental Biology**, Punjab, v. 5, p. 839–846, 2011.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH (US). 2016. **Office of dietary supplements: Zinc, fact sheet for health professionals**. Rockville: Department of Health & Human Services. Disponível em: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-HealthProfessional>. Acesso. 15 jul. 2017.

NEWELL-MCGLOUGHLIN, M. Nutritionally improved agricultural crops. **Journal of Plant Physiology**, Rockville, v. 147, n. 3, p. 939-953, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.108.121947>>

OZDENER, Y.; AYDIN, B. K. The effect of zinc on the growth and physiological and biochemical parameters in seedling of *Eruca sativa* (L) (Rocket). **Acta Physiologiae Plantarum**, Warszawa, v. 32, n. 3, p. 469-476, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11738-009-0423-z>>

OZDENER, Y.; KUTBAY, H. G. Toxicity of copper, cadmium, nickel, lead and zinc on seed germination and seedling growth in *Eruca sativa*. **Fressenius Environmental Bulletin**, Basel, v. 18, n. 1, p. 26-31, 2009.

PFEIFFER, W. H.; MACCLAFFERTY, B. Biofortification: breeding micronutriente-dense crops. In: Kang, M. S. In: PRIYADARSHAN, P. M. **Breeding major food Staples**. Blackwell Science: New York, 2007. p. 61-91.

PURQUERIO, L. F. V.; DEMANT, L. A. R.; GOTO, R.; VILLAS BOAS, R. L. Efeito da adubação nitrogenada de cobertura e do espaçamento sobre a produção de rúcula. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 464-470, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362007000300028>>

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. W. O mercado da rúcula. **Instituto Agrônomo de Campinas**. 2007. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Rucula/Rucula.htm>>. Aceso em: 20 jul. 2017.

QIAO, X.; HE, Y.; ZHENMEI, W.; LI, X.; ZHANG, K.; ZENG, H. Effect of foliar spray of B carbonic anhydrase expression and enzyme activity in rice (*Oryza sativa* L.) leaves. **Acta Physiologiae Plantarum**, Warszawa, v. 36, n. 2, p. 263-272, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11738-013-1407-6>>

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, N. A. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas (SP): Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 8-13.

RAMANI, S.; KANNAN, S. Studies on translocation of zinc in bean plants: evidence for retranslocation during new growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 121, n. 4, p. 313-318, 1985. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(85\)80024-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(85)80024-9)>

RENA, A. B.; FÁVARO, J. A. R. Nutrição do cafeeiro via folha. In: ZAMBOLIN, L. **Café, produtividade, qualidade e sustentabilidade**. Vicosa: UFV, 2000. p.149-208.

RESENDE, G. M.; YURI, J. E.; SOUZA, R. J. Épocas de plantio e doses de zinco em alface tipo americana. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 510-514, 2008.

RIBEIRO, N. D.; SANTOS, O. M. Aproveitamento do zinco aplicado na semente na nutrição da planta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 159-165, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781996000100030>>

ROOSTA, H. R.; ESTAJI, A.; NIKNAM, F. Effect of iron, zinc and manganese shortage induced change on photosynthetic pigments, some osmoregulators and chlorophyll fluorescence parameters in lettuce. **Photosynthetica**, Praga, v. 55, p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0696-1>

ROSSI, F.; FABRI, E. G.; SALA, F. C.; RONDINO, E.; MINAMI, K.; MELO, C. T.; COSTA, C. P. Caracterização varietal de rúcula (*Eruca sativa*) cultivada. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 391, 2004.

SAFAYA, N. M.; GUPTA, A.P. Differential susceptibility of corn cultivars to zinc deficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 1, p. 132-136, 1979. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100010033x>>

SAGARDOY, R.; MORALES, F.; LÓPEZ-MILLÁN, A. F.; ABADÍA, A.; ABADÍA, J. Effects of zinc toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 11, n. 3, p. 339-350, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x>>

SALTZMAN, A.; BIROL, E.; BOUIS, E.; BOY, E.; DE MOURA, F.; ISLAM, Y.; PFEIFFER, H. Biofortification: Progress toward a more nourishing future. **Global Food Security**, Washington, v. 20, n. 1, p. 9–17, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.12.003>>

SARRET, G.; WILLEMS, G.; ISAURE, M. P.; MARCUS, M. A.; FAKRA, S. C.; FREROT, H.; PAIRIS, S.; GEOFFROY, N.; MANCEAU, A.; LAPRADE, P. S. Zinc distribution and speciation in *Arabidopsis halleri* x *Arabidopsis lyrata* progenies presenting various zinc accumulation capacities. **New Phytologist**, London, v. 184, n. 3, p. 581-595, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02996.x>>

SARTORI, R. H. **Absorção, transporte e redistribuição de zinco em laranjeiras**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SEEMA, R.; MEENA, R.; YADAV, S.; JATAV, S. S.; MEENA, R. N.; KUMAR, S. Effect of zinc sulphate and organics on zinc content and yield on spinach grown in Inceptisol of Varanasi, India. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 6, n. 2, p. 473-479, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.053>>

SEETHAMBARAM, Y.; DAS, V. S. Effect of zinc deficiency on enzyme activities of nitrate reduction and ammonia assimilation of *Oryza sativa* L. and *Pennisetum americanum* L. **Proceedings of the Indian National Science Academy**, New Delhi, v. 52, n. 4, p. 491-494, 1986.

SHARMA, A.; PATNI, B.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Zinc - An Indispensable Micronutrient. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v. 19, n. 1, p. 11-20, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12298-012-0139-1>>

SHI, G. R.; CAI, Q. S. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to zinc stress. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 53, n. 2, p. 391-394, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10535-009-0074-3>>

SINGH, A. K.; BHATT, B. P. Effect of foliar application of zinc on growth and seed yield of late-sown lentil (*Lens culinaris*). **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 83, n. 6, p. 622-626, 2013.

SOUZA, E. G. **Produtividade e rentabilidade de Rúcula adubada com espécie espontânea, em duas épocas de cultivo**. 2014. 63f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, 2014.

STACEY, S. P.; OOSTERHUIS, D. M. Effect of EDTA on the foliar absorption of trace element fertilizers. In: SLATON, N. A. **Arkansas Soil Fertility**: Wayne, p. 80-81, 2007.

STEIN, A. J.; MEENAKSHI, J. V.; QAIM, M.; NESTEL, P.; SACHDEV, H. P. S.; BHUTTA, Z. A. **Technical Monograph 4. Analysing the Health Benefits of Biofortified Staple Crops by Means of the Disability-Adjusted Life Years**



**Approach: A Handbook Focusing on Iron, Zinc and Vitamin A.** Washington, WA: HarvestPlus, 2005. p. 12-13.

STEVENINCK, R. F.; BABARE, A.; FERNANDO, D. R.; VAN STEVENINCK, M. E. The binding of zinc, but not cadmium, by phytic acid in roots of crop plants. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 167, n. 1, p. 157–164, 1994.

SUTTER, K.; JUNG, K.; KRAUSS, J. Effects of heavy metals on the nitrogen metabolism of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* L. ex Hedw: A <sup>15</sup>N tracer study. **Environmental Science and Pollution Research**, Landsberg, v. 9, n. 6, p.417-421, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02987592>>

TAPPERO, R.; PELTIER, E.; GRÄFE, M.; HEIDEL, K.; GINDER-VOGEL, M.; LIVI, K. J.; RIVERS, M. L.; MARCUS, M. A.; CHANEY, R. L.; SPARKS, D. L. Hyperaccumulator *Alyssum murale* relies on a different metal storage mechanism for cobalto than for nickel. **New Phytologist**, London, v. 175, n. 1, p. 641–634, 2007.

TERZANO, R.; CHAMIL, Z. A.; VEKEMANS, B.; JANSSENS, K.; MIANO, T.; RUGGIERO, P. Zinc distribution and speciation within Rocket plants (*Eruca vesicaria* L. *Cavalerii*) grown on a polluted soil amended with compost as determined by XRF microtomography and micro-XANES. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 9, p. 3222-3231, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/jf073304e>>

TEWARI, R. K.; KUMAR, P.; SHARMA, P. N. Morphology and physiology of zinc-stressed mulberry plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Santiago, v. 171, n. 1, p. 286–294, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200700222>>

TRANI, P. E.; PUQUÉIRO, L. F.; FIGUEIREDO, G. J. B; TIVELLI, S. W.; BLAT, S. F. **Calagem e adubação da alface, almeirão, agrião d'água, chicória, coentro, espinafre e rúcula.** Instituto Agrônômico de Campinas, 2014, 16p.

UPADHYAYA, C. P.; AKULA, N.; KIM, H. S.; JEON, J. H.; HO, O. M.; CHUN, S. C.; KIM, D. H.; PARK, S. W. Zinc reduces copper toxicity induced oxidative stress by promoting antioxidant defense in freshly grown aquatic duckweed *Spirodela polyrhiza* L. **Journal of Hazard Materials**, Amsterdam, v. 175, n. 3, p. 1081–1084, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.016>>

URLIC, B.; DUMICIC, G.; GORETA BAN, S. Zinc and sulfur effects on growth and nutriente concentrations in Rocket. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 45, n. 13, p. 1831-1839, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2014.909829>>

VELU, G.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; CAKMAK, I.; HAO, Y.; SINGH, R. P. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. **Journal of Cereal Science**, New Delhi, v. 59, n. 3, p. 365-372, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.09.001>>

WANG, J.; MAO, H.; ZHAO, H.; HUANG, D.; WANG, Z. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 89-96, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.010>>

WATERS, B. M.; SANKARAN, R. P. Moving micronutrientes from the soil to the seeds: genes and physiological processes from a biofortification perspective. **Plant Science**, Nebraska, v. 180, n. 1, p. 562–574, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.12.003>>

WHITE, P. J.; WHITING, S. N.; BAKER, A. J.; BROADLEY, M. R. Does zinc move apoplastically to the xylem in roots of *Thlaspi caerulescens*? **New Phytologist**, London, v. 153, n. 1, p. 201–207, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00325.x>>

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortifying crops with essential mineral elements. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 10, n. 12, p. 586–593, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.10.001>>

WHITE, P. J.; BRADSHAW, J. E.; DALE, M. F.; RAMSAY, G.; HAMMOND, J. P.; BROADLEY, M. R. Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. **HortScience**, New York, v. 44, n. 1, p. 6–11, 2009.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets — Iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, London, v. 182, n. 1, p. 49–84, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>>

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 1, p. 1073–1080, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0677-7>>

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Physiological limits to Zinc biofortification of edible crops. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00080>>

WU, J.; SCHAT, H.; SUN, R.; KOORNNEEF, M.; WANG, X.; AARTS, M. G. Characterization of natural variation for zinc, iron and manganese accumulation and zinc exposure response in *Brassica rapa* L. **Plant and Soil**, The Hague, v. 291, n. 1-2, p. 167-180, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-006-9184-2>>

YANYAN, W.; SHOHAG, M. J. I.; YANG, X. Biofortification and bioavailability of rice grain zinc as affected by different forms of foliar zinc fertilization. **Plos One**, San Francisco, v. 7, n. 9, p. 1-10, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045428>>

YUCEL, H.; SAHIN, S.; SAGLAM, N.; AYDIN, M.; CAKMAK, P.; GEBOLOGLU, N. Foliar applications of Ca, Zn and Urea on Crispy lettuce in Soilless Culture. **Soil-Water Journal**, Praga, v. 2, n. 2, p. 23-30, 2013.

YURI, J. E.; RESENDE, G. M.; MOTA, J. H.; SOUZA, R. J.; CARVALHO, J. G. Produção de alface americana, em função de doses e épocas de aplicação de zinco. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 4, p. 665-669, 2006.

ZHANG, Y.; SONG, Q.; JAN, Y.; TANG, J.; ZHAO, R.; ZHANG, Y.; HE, Z.; ZOU, C.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Mineral element concentrations in grains of Chinese Wheat cultivars. **Euphytica**, Durham, v. 174, n. 3, p. 303-313, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10681-009-0082-6>>

ZHAO, F.J.; SHEN, Z.G.; MCGRATH, S.P. Solubility of zinc and interaction between zinc and phosphorus in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. **Plant, Cell and Environment**, New York, v. 21, n. 1, p. 108-114, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00270.x>>

ZHAO, F. J.; LOMBI, E.; BREEDON, T.; MCGRATH, S. P. Zinc hyperaccumulation and cellular distribution in *Arabidopsis halleri*. **Plant, Cell and Environment**, New York, v. 23, n. 5, p. 507–514, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00569.x>>

ZHAO, H.; WU, L.; CHAI, T.; ZHANG, Y.; MA, S. The effect of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese hyperaccumulator *Phytolacca americana*. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 169, n. 13, p. 1243-1252, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.016>>

ZHAO, L.; SUN, Y.; HERNANDEZ-VIEZCAS, J. A.; SERVIN, A. D.; HONG, J.; NIU, G.; PERALTA-VIDEA, J. R.; DUARTE-GARDEA, M.; GARDEA-TORRESDEY, J. L. Influence of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: a life cycle study. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 61, n. 49, p. 11945-11951, 2013. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf404328e>>

ZHI, Y.; DENG, Z.; LUO, M.; DING, W.; HU, Y.; DENG, J.; LI, Y.; ZHAO, Y.; ZHAND, X.; WU, W.; HUANG, B. Influence of heavy metal on seed germination and early seedling growth in *Eruca sativa* Mill. **American Journal of Plant Sciences**, Irvine, v. 6, n. 5, p. 582-590, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.65063>>