

LETÍCIA DE MELO FERREIRA

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS E DE PRODUÇÃO DE ALFACE A
FERTILIZANTES NANOPARTICULADOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO
NUTRITIVA EM SISTEMA HIDROPÔNICO COMERCIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientador: Cláudio Pagotto Ronchi

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade Federal
de Viçosa - Campus Florestal**

T

F383r
2021
Ferreira, Letícia de Melo, 1990-
Respostas ecofisiológicas e de produção de alface a
fertilizantes nanoparticulados empregados na solução nutritiva
em sistema hidropônico comercial. / Letícia de Melo Ferreira. –
Florestal, MG, 2021.
95 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Cláudio Pagotto Ronchi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Nutrição mineral. 2. Concentrações de nutrientes.
3. Fontes de nutrientes-crescimento. 4. Produção de alface
hidropônica. I. Universidade Federal de Viçosa. Instituto de
Ciências Agrárias. Mestrado em Manejo e Conservação de
Ecossistemas Naturais e Agrários. II. Título.

LETÍCIA DE MELO FERREIRA

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS E DE PRODUÇÃO DE ALFACE A
FERTILIZANTES NANOPARTICULADOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO
NUTRITIVA EM SISTEMA HIDROPÔNICO COMERCIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de março de 2021.

Assentimento:



Letícia de Melo Ferreira
Autora



Cláudio Pagotto Ronchi
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre permitir a realização dos meus sonhos, dando-me o dom da vida.

À Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal, ao MCENA, ao IAF e ao Setor de Olericultura, pela a oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor Cláudio Pagotto Ronchi, pelos ensinamentos, pelo exemplo de profissional e pessoa, pela motivação, e, principalmente, por me fazer compreender a importância do processo.

Ao professor Adilson de Castro Antônio, pelo auxílio, disponibilidade e contribuições na condução das pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa (Código de Financiamento 001).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

À Prime Agro, pelo apoio financeiro para as análises nutricionais.

À Diovana, Marcos, Felipe, Alisson Moreira, Mariane, Raíza, Rafael, Danila e Alisson Campos pelo companheirismo, amizade, apoio e ajuda na condução das atividades durante o experimento.

À equipe do LASP (Laboratory for Abiotic Stress Physiology), Isadora Medina, Marina Mariá, Camila Rios e Paulo Pimentel, pela ajuda na condução dos testes.

Aos servidores do Campus UFV – Florestal, que cada qual em sua área, ajudaram-me nesse projeto.

Aos professores Lessando Moreira Gontijo e Eduardo Gusmão Pereira, pela dedicação, ensinamentos e empréstimo de equipamentos.

Aos membros da banca, pelas contribuições e correções neste trabalho.

Às amigas Raíza Dutra e Rayana Carvalho, pelo apoio sincero.

À minha família, pelos momentos de distração.

Ao meu namorado, Samuel Souza, por ter sido presença paciente em todas as etapas desse projeto.

“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso!
Não se apavore, nem desanime, pois o Senhor, o
seu Deus, estará com você por onde você andar.”

Josué 1:9

RESUMO

FERREIRA, Letícia de Melo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Respostas ecofisiológicas e de produção de alface a fertilizantes nanoparticulados empregados na solução nutritiva em sistema hidropônico comercial.** Orientador: Cláudio Pagotto Ronchi.

Tecnologias modernas como os fertilizantes nanoparticulados têm mostrado grande potencial na agricultura, mas com nenhum estudo aparente na produção comercial de hortaliças em sistema hidropônico. O objetivo neste estudo foi avaliar as respostas ecofisiológicas e produtivas de alfaces hidropônicas em cultivo comercial, em ambiente protegido, utilizando fertilizantes nanoparticulados à base de Ca, Cu, Mn e Zn. Para isso, foram instalados cinco experimentos em sistema hidropônico com fluxo laminar de nutrientes (NFT), em delineamento inteiramente casualizado. Nos quatro primeiros, o desenvolvimento da cultivar Vanda® foi avaliado em função de cada um dos fertilizantes nanoparticulados nas concentrações de 0,0, 39,9, 79,8, 119,7, 159,6, 239,4 e 319,2 ppm de Ca; 0,00, 0,01, 0,03, 0,06, 0,12, 0,24 e 0,47 ppm de Cu; 0,00, 0,07, 0,15, 0,29, 0,58, 1,16 e 2,33 ppm de Mn e 0,00, 0,01, 0,02, 0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 ppm de Zn. No quinto experimento, comparou-se o desenvolvimento da cultivar em solução nutritiva contendo as melhores concentrações de todos os fertilizantes nanoparticulados (S1) àquelas contendo fertilizantes convencionais nas concentrações encontradas (S2) ou nas concentrações tradicionalmente utilizadas (S3). O crescimento das plantas de alface foi avaliado a cada 5 dias. Avaliaram-se, também, ao final dos experimentos, as trocas gasosas e os teores foliares de pigmentos fotossintéticos e de macro e micronutrientes. Os dados de crescimento foram analisados por superfície de resposta ou por efeito isolado das concentrações ou das épocas de coletas, gerando equações de regressão que permitiram estimar as concentrações associadas a 90% do crescimento máximo (C90). Dados de trocas gasosas, teores foliares de pigmentos fotossintéticos e de macro e micronutrientes foram submetidos à análise de variância e de regressão. Os resultados apontaram como C90 as concentrações de 95,60 ppm de Ca, 0,19 ppm de Cu e 0,0047 ppm de Zn; para o Mn, não houve efeito. As concentrações não afetaram o teor de pigmentos foliares nem as trocas gasosas, à exceção da redução verificada em A e em A/E com o aumento da concentração de Cu. O aumento da concentração dos nutrientes na solução nutritiva proporcionou aumento quadrático no teor de Ca na parte aérea, exponencial no de Cu e Mn, e sigmoidal no de Zn; no caso do Ca, seu aumento ainda reduziu os teores de S e de Cu na parte aérea. O aumento da concentração de micronutrientes não afetou os teores de macronutrientes na parte aérea da alface, mas o

aumento da concentração de Zn aumentou o teor de Cu. Os conteúdos de N, P, K, Ca, Fe Mn e B foram afetados pelas diferentes concentrações de Cu na solução nutritiva. Não houve diferenças ecofisiológicas nem produtivas entre as alfaces produzidas pelas soluções nutritivas S1, S2 e S3. Dessa forma considera-se que é possível produzir alfaces crespas em NFT com solução nutritiva formulada à base de fertilizantes nanoparticulados ou convencionais em concentrações diferentes das tradicionais.

Palavras-chave: Nutrição mineral. Concentrações de nutrientes. Fontes de nutrientes. Crescimento.

ABSTRACT

FERREIRA, Letícia de Melo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2021. **Ecophysiological and productive responses of nanoparticulate fertilizers in nutrient solution in commercial hydroponic system.** Adviser: Cláudio Pagotto Ronchi.

Modern technologies such as nanoparticulate fertilizers have shown great potential in agriculture, but with no apparent study in commercial production of vegetables in hydroponic system. This work was carried out to evaluate ecophysiological responses and production of hydroponic lettuces in commercial cultivation, in protected environment, using nanofertilizers based on Ca, Cu, Mn and Zn. Therefore, five experiments were set up in nutrient film technique system (NFT), in a completely randomized design. In the first four, Vanda® cultivar development was evaluated according to the concentrations of each nanofertilizer tested at concentrations of 0.0, 39.9, 79.8, 119.7, 159.6, 239.4 and 319.2 ppm of Ca; 0.00, 0.01, 0.03, 0.06, 0.12, 0.24, 0.47 ppm of Cu; 0.00, 0.07, 0.15, 0.29, 0.58, 1.16, 2.33 ppm Mn; and 0.0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 ppm Zn. In the fifth experiment, the cultivar development in nutrient solution containing the best concentrations of all nanofertilizers (S1) was compared to that containing conventional fertilizers in the concentrations found (S2) or in traditionally used concentrations (S3). The growth of lettuce plants was evaluated every 5 days. At the end of the experiments, gas exchange and leaf photosynthetic pigments content and macro and micronutrients were also evaluated. The growth data were analysed either by response surface or by isolated effect of concentrations or harvest time, generating regression equations that allowed to estimate the concentrations associated with 90% of the maximum growth (C90). Gas exchange data, leaf contents of photosynthetic pigments and macro and micronutrients were analysed through analysis of variance and regression. Results indicated as C90 the concentrations of 95.60 ppm of Ca, 0.19 ppm of Cu and 0.0047 ppm of Zn; for Mn, there was no effect. Concentrations did not affect leaf pigments content nor gas exchange, except for the reduction observed in A and A/E with the increase in Cu concentration. Increase the nutrients concentration in nutrient solution provided an increase, quadratic for Ca, exponential for Cu and Mn, and sigmoidal for Zn, of its content in aerial part of plant. The increase of Ca concentrations reduced S and Cu contents in the aerial part. The increase of micronutrients concentrations did not affect macronutrients contents in lettuce aerial part, but the increase Zn concentration increased Cu content. N, P, K, Ca, Fe Mn and B contents were affected by different Cu concentrations. There were no ecophysiological and productive differences in lettuces produced by nutrient

solutions S1, S2 and S3. In this way, it is considered possible to produce curly lettuces in NFT with a nutrient solution formulated based on nanoparticulate fertilizers or conventional fertilizers in concentrations different from the traditional ones.

Keywords: Mineral nutrition. Nutrient concentrations. Nutrient sources. Growth.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 A cultura da alface	14
3.2 Cultivo hidropônico de alface.....	14
3.3 Nanofertilizantes	16
3.4 Nutrição mineral	17
3.4.1 Nutrientes minerais	17
3.4.1.1 Função dos nutrientes (com ênfase apenas em Ca, Cu, Mn e Zn).....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Condições experimentais	20
4.2 Testes preliminares	20
4.2.1 Análises da água e das soluções nutritivas	20
4.2.2 Análises de substratos	21
4.2.3 Fertirrigação das mudas	23
4.3 Soluções nutritivas	23
4.3.1 Experimento com cálcio.....	25
4.3.2 Experimentos com micronutrientes.....	25
4.3.3 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes.....	26
4.4 Manejo da solução e condução das plantas.....	27
4.5 Avaliações.....	28
4.5.1 Análise de crescimento.....	28
4.5.2 Trocas gasosas.....	29
4.5.3 Análise dos teores foliares de pigmentos	29
4.5.4 Avaliação do estado nutricional	30
4.6 Análises estatísticas	30
4.6.1 Experimentos para definições de concentrações	30
4.6.1.1 Obtenção das concentrações de cada nutriente	30
4.6.1.2 Trocas gasosas, teores foliares de pigmentos e teores de macro e micronutrientes.....	31
4.6.2 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes.....	31
5. RESULTADOS.....	32
5.1 Experimento com Ca.....	32

5.1.1 Crescimento.....	32
5.1.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos	37
5.1.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	39
5.2 Experimento com Cu	43
5.2.1 Crescimento.....	43
5.2.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos	47
5.2.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	50
5.3 Experimento com Mn	53
5.3.1 Crescimento.....	53
5.3.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos	58
5.3.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	60
5.4 Experimento com Zn.....	64
5.4.1 Crescimento.....	64
5.4.2 Teores foliares de pigmentos.....	69
5.4.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	70
5.5 Resumo dos experimentos com Ca, Cu, Mn e Zn.....	74
5.6 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes	75
5.6.1 Crescimento.....	75
5.6.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos	77
5.6.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	79
6. DISCUSSÃO	81
6.1 Experimentos com nanofertilizantes à base de Ca, Cu, Mn e Zn testados isoladamente. 81	
6.1.1 Crescimento.....	81
6.1.2 Superfícies de resposta: C100 e C90.....	81
6.1.3 Trocas gasosas, teores foliares de pigmentos	84
6.1.4 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes.....	85
6.2 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes	86
REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO GERAL

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma hortaliça com alto teor de fibras, vitaminas A, K, B9 e compostos bioativos na sua composição (BASLAM et al., 2011; MAMPHOLO et al., 2016). Seu consumo se dá principalmente in natura, na forma de saladas, que podem ser variadas em cores e texturas devido à grande diversidade de cultivares. Essa diversidade, associada ao baixo custo de produção, permite e estimula seu cultivo em todas as regiões do país (MONTEIRO FILHO et al., 2018a). De acordo com o censo do IBGE existem 108.603 estabelecimentos agropecuários produtores de alface no país, que produziram 908.186 t em 2017.

Embora não se tenha dados atualizados sobre a alficultura, sabe-se que grande parte da produção vem da agricultura familiar ou de pequenos e médios produtores (CNA, 2017), e que dada a alta perecibilidade do produto eles se encontram próximos aos centros consumidores, nos arredores das cidades. O grande desafio desses produtores é produzir alimentos com qualidade para a população mundial, projetada em 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (UN DESA, 2019), com recursos como água, área produtiva e insumos agrícolas limitados.

Por isso, é imprescindível o aprimoramento tecnológico contínuo das Ciências Agrárias, visando aos incrementos na produção de alimentos, com uso eficiente dos recursos produtivos. Nesse sentido, o melhoramento genético da alface permitiu estender o período de cultivo no verão, quando as condições climáticas de alta temperatura e pluviosidade limitavam seu cultivo (SALA; COSTA, 2012), além de introduzir resistência às principais doenças da cultura. Os sistemas de produção também influenciam positivamente a alficultura. A alface, comumente produzida no solo e em campo aberto, vem migrando para ambientes protegidos, que diminuem os riscos de produção, e para sistemas hidropônicos, mais eficientes no uso de insumos. Atualmente, já se fala inclusive em sistemas de produção vertical e indoor dessa cultura.

Hidroponia é uma técnica antiga, na qual são oferecidos suporte, oxigênio e nutrientes juntamente à água para o crescimento da planta, sem o uso de solo. Essa técnica, além de ser mais eficiente no uso da água, podendo economizar 64% se comparado ao cultivo no solo, pode promover redução no ciclo da cultura e ainda ser estabelecida em áreas urbanas ou com menor aptidão agrícola (MAJID et al., 2020). Das modalidades de sistema hidropônico, o NFT (Nutrient Film Technique – Técnica do Fluxo Laminar de Nutrientes) é o mais empregado para produção de alfaces (COMETTI et al., 2013).

Nesse sistema hidropônico a solução nutritiva é responsável por fornecer os nutrientes às plantas. Quanto mais eficientes forem os fertilizantes utilizados em sua composição, maiores serão os ganhos produtivos. Logo, os fertilizantes à base de nanopartículas (de 1-100 nm em pelo menos uma dimensão) são tecnologias modernas promissoras. Fertilizantes contendo nanopartículas podem não somente aumentar a produtividade das culturas como também reduzir as perdas de nutrientes, principalmente em aplicações via foliar e solo (DIMKPA; BINDRABAN, 2018).

Dessa forma, conciliar o sistema hidropônico de produção comercial de alfaces com o uso de fertilizantes nanoparticulados pode incrementar a produção, com menores concentrações dos nutrientes. Apesar do potencial dos fertilizantes nanoparticulados, o cultivo comercial de alface hidropônica carece de pesquisas aplicadas para definição das concentrações adequadas de cada nutriente à base de nanopartículas na solução nutritiva.

Diante do exposto, esse trabalho testa a hipótese de que fertilizantes contendo nutrientes nanoparticulados influenciam positivamente o estado nutricional, o desempenho fotossintético, e, conseqüentemente, o crescimento e a produtividade de alface crespa no sistema NFT comercial.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as respostas ecofisiológicas e de produção de alface crespa em função da utilização de fertilizantes nanoparticulados à base de Ca, Cu, Mn e Zn na solução nutritiva, em sistema de cultivo hidropônico comercial.

2.2 Objetivos específicos

i) Realizar quatro cultivos de alface em sistema hidropônico NFT para testar, de forma isolada, os efeitos das concentrações de fertilizantes nanoparticulados à base de Ca, Cu, Mn e Zn na produção dessa hortaliça;

ii) Estabelecer as curvas de crescimento de plantas de alface crespa cultivadas com diferentes concentrações dos fertilizantes nanoparticulados;

iii) Avaliar as trocas gasosas, os teores foliares de pigmentos fotossintéticos e o estado nutricional de plantas de alface cultivadas com fertilizantes nanoparticulados na solução nutritiva;

iv) Definir a concentração de cada fertilizante nanoparticulado responsável por promover 90% do crescimento máximo da alface em NFT;

v) Comparar as respostas ecofisiológicas e de produção entre alfaces cultivadas em solução contendo as melhores concentrações dos fertilizantes nanoparticulados e alfaces cultivadas com fertilizantes convencionais.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A cultura da alface

A alface (*Lactuca sativa* L.), originária do mediterrâneo, é uma planta mundialmente popular, cujo interesse principal é por suas folhas (ZHAO et al., 2016). Pertencente à família Asteraceae, a alface possui inicialmente uma fina raiz principal, que, posteriormente, será um sistema radicular fasciculado; caule ereto, com folhas dispostas em espiral, formando uma roseta densa ou uma cabeça antes do florescimento (KŘÍSTKOVÁ et al., 2008). É uma planta anual, de ciclo curto, favorecida pelo clima ameno; altas temperaturas aceleram o ciclo cultural, e, dependendo do genótipo, pode resultar em plantas menores, dado a ocorrência do pendoamento precoce (SILVA et al., 1999).

A formação de cabeça e o tipo de folha permitem classificar a alface em cinco grupos: crespa, americana, lisa, mimosa e romana, sendo a crespa o principal grupo cultivado e consumido no Brasil, apresentando, portanto, maior importância econômica no mercado (EMBRAPA HORTALIÇAS, 2019). Dentro do grupo crespa, destaca-se a cultivar Vanda (Sakata ®), empregada neste trabalho, que apresenta grande porte, folhas compridas, talo grosso, sistema radicular vigoroso e resistência à deficiência de Ca (CECCHERINI et al., 2018) e ao vírus do mosaico da alface (LMV) (SALA; COSTA, 2012).

3.2 Cultivo hidropônico de alface

Embora a hidroponia seja uma técnica antiga, sua viabilidade em escala comercial se deu na década de 60 (MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004), chegando ao Brasil na década de 90. Uma vez que a produção de hortaliças é dinâmica e descentralizada torna-se difícil realizar levantamento sobre sua produção. Particularmente sobre a produção de alface hidropônica não há informação disponível (BARCELOS, 2018). Sabe-se, no entanto, que as regiões metropolitanas são importantes produtoras (IBGE, 2017), pois, devido à perecibilidade do produto, essas regiões favorecem o escoamento e diminuem gastos com transporte (MESQUITA et al., 2019).

A palavra hidroponia tem origem dos radicais gregos hydro = água e ponos = trabalho, e consiste na substituição do solo por uma solução aquosa que fornecerá os nutrientes para produção vegetal. Existem vários sistemas hidropônicos, sendo os mais utilizados: cultivo na água (“floating”), fluxo laminar de nutrientes (NFT) e sistemas com substratos (FURLANI et al., 2009).

A produção de alfaces hidropônicas se dá principalmente na modalidade NFT (COMETTI et al., 2013). Essa técnica consiste na circulação da solução nutritiva em sistema

fechado de canais que mantém as raízes em contato direto com a solução nutritiva (MARTINEZ-MATE et al., 2017). A circulação da solução nutritiva é controlada por timer que aciona o funcionamento da bomba durante o período desejado. Ao retornar ao reservatório, a solução nutritiva sofre uma queda promovendo a oxigenação da mesma, caso a oxigenação não seja suficiente, pode-se utilizar bomba de injeção de oxigênio.

A alface adaptou-se facilmente ao sistema NFT, com alto rendimento e redução no ciclo em comparação ao cultivo no solo (PAULUS et al., 2012; MARTINEZ-MATE et al., 2017; MAJID et al., 2020), maior vida de prateleira e menor contaminação microbiana do produto (SELMA et al., 2012). Por exemplo, plantas de alface cultivadas em sistema hidropônico NFT apresentaram maior acúmulo de biomassa em razão das melhores condições nutricionais, maior teor de clorofilas a, b e totais e menor estresse hídrico (SOUZA et al., 2019). Adicionalmente, esse sistema permite economia de 64% de água se comparado ao plantio no solo (MAJID et al., 2020). Como desvantagem, faz-se necessário alto investimento inicial para adoção da técnica (MONTEIRO FILHO, 2018b).

A produção de qualquer espécie vegetal em sistema hidropônico é dependente da solução nutritiva. Devido à ausência do solo, cabe à solução nutritiva oferecer, de forma balanceada, todos os nutrientes necessários ao crescimento e desenvolvimento vegetal (MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004). Ela fornece, também, o oxigênio (COMMETI et al., 2013).

Em relação à água utilizada na solução nutritiva, deve-se conhecer suas características químicas (salinidade e potencial hidrogeniônico - pH) e microbiológicas (patógenos, como coliformes fecais) (FURLANI et al., 2009). Embora o emprego de águas salinas no cultivo hidropônico seja indicado (PAULUS et al., 2012), altos níveis de salinidade reduzem a matéria fresca da alface (ALVES et al., 2011). Adicionalmente, o aumento na concentração salina da solução, somada à possível elevação de sua temperatura, reduz o teor de água na planta (COMMETI et al., 2013), o que é indesejável.

A concentração salina da solução nutritiva geralmente é monitorada com condutímetro, que fornece uma medida da quantidade de sais dissolvido, no entanto, não discrimina os nutrientes (FURLANI et al., 2009). Para produção de alfaces é utilizada condutividade elétrica (CE) entre 1,5 e 2,0 mS cm⁻¹ e pH variando de 5,5 a 6,5 (MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004). A combinação e a quantidade de cada nutriente levam à formulação das várias soluções nutritivas encontradas na literatura (HOAGLAND; ARNON, 1950; MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004).

3.3 Nanofertilizantes

As nanopartículas vêm sendo utilizadas em vários processos industriais devido às suas características intrínsecas como tamanho reduzido (de 1-100 nm em pelo menos uma dimensão), que lhes conferem alta relação superfície/volume. Na agricultura podem ser empregadas no controle fitossanitário (ZHAO et al., 2016; YUSEFI-TANHA et al., 2020), manejo nutricional (DIMKPA; BINDRABAN, 2018), priming de sementes (RAWASHDEH et al., 2020) e como reguladores de crescimento (YUSEFI-TANHA et al., 2020). As nanopartículas promovem diretamente o crescimento da planta, melhoram a fotossíntese e conferem melhor resistência das plantas a estresse bióticos e abiótico (ZHAO et al., 2020).

A aplicação de nanopartículas fornece nutrientes às plantas de maneira eficaz, devido às propriedades associadas ao seu tamanho pequeno (BALA et al., 2019; PRADHAN et al., 2013). Por exemplo, a aplicação foliar de nanopartículas de Zn em arroz garantiu maior produtividade, o que pode estar relacionado às atividades bioquímicas e fisiológicas que conferiram maior crescimento da cultura (BALA et al., 2019). A aplicação de nanopartículas de Cu incrementou os valores nutricionais dos bulbos de cebolinha (*Allium fistulosum*), aumentando as concentrações de Mg e Ca (WANG et al., 2020). Outros relatos da utilização de nanopartículas na agricultura estão descritos em Zhao et al. (2020).

Embora os mecanismos de absorção das nanopartículas pelas plantas ainda não estejam completamente elucidados (GOMES et al., 2020), pesquisas sugerem que o uso de fertilizantes nanoparticulados pode estimular o desenvolvimento vegetal (JACOBSON et al., 2018; BALA et al., 2019; YUSEFI-TANHA et al., 2020). Podem ainda, controlar a absorção e translocação de alguns elementos essenciais e metais pesados tóxicos em plantas (SHARIFAN et al., 2019).

Entretanto, é controverso o efeito das nanopartículas no desenvolvimento vegetal. Alguns estudos demonstraram que elas podem de fato ser mais eficientes do que os fertilizantes convencionais (KOPITTKKE et al., 2019; YUSEFI-TANHA et al., 2020), especialmente agindo como uma fonte de liberação lenta; ou ainda que elas têm a mesma ou menor eficiência do que fertilizantes convencionais (KOPITTKKE et al., 2019). Assim, é necessário investigação contínua para compreender as condições em que o uso de nanopartículas é mais eficiente que fertilizantes convencionais (KOPITTKKE et al., 2019).

Uma vez que as respostas das plantas aos fertilizantes nanotecnológicos dependem do nanomaterial, da sua concentração e tempo de exposição, e da planta alvo (REDDY et al., 2016; LIU et al., 2016; VANKOVA et al., 2017; DIMKPA; BINDRABAN, 2018; GARCÍA-GÓMEZ et al., 2018; YUSEFI-TANHA et al., 2020), torna-se necessário realizar

pesquisas testando esses fatores. Ademais, é mister ajustar as concentrações de fertilizantes nanoparticulados para promoção de crescimento e produtividade das culturas, evitando prejuízos ao desenvolvimento vegetal (JACOBSON et al., 2018) e possíveis gastos com excessos de fertilizantes.

A maioria dos fertilizantes à base de nanopartículas são comercializados em suspensões concentradas. Apesar de não se conhecer a quantidade de produtos nanoparticulados e de fabricantes desses insumos no Brasil, sabe-se que há tanto empresas tradicionais do ramo de fertilizantes como startups atuando fortemente nesse mercado. Também não foram encontradas pesquisas com nanofertilizantes na solução nutritiva como sugerido neste trabalho, pois sua aplicação se dá, na maioria das vezes, via foliar ou via solução do solo.

3.4 Nutrição mineral

3.4.1 Nutrientes minerais

No geral, a água representa cerca de 90% do peso da matéria fresca das plantas herbáceas, e, mais de 90% do peso da matéria seca dessas plantas é composto por C, H e O (EPSTEIN, 1972), obtidos em abundância no ar e na água. Embora eles representem maior parte da matéria seca, o crescimento e desenvolvimento das plantas são, também, fortemente limitados pelos 10% restante, formados pelos nutrientes minerais.

Considera-se nutrientes os elementos químicos essenciais ao desenvolvimento vegetal. Para isso, os elementos precisam atender aos critérios de essencialidade de Arnon e Stout (1939): 1) ser essencial ao crescimento e desenvolvimento da planta, de forma que na sua ausência a planta seja incapaz de completar seu ciclo; 2) sua função tem de ser específica, não podendo o elemento ser substituído por outro quimicamente semelhante; e 3) o elemento deve estar envolvido diretamente no metabolismo da planta ou ser requerido para uma etapa metabólica específica. Embora o C, H e O atendam aos três critérios mencionados, eles não são considerados nutrientes minerais, restando assim, 14 nutrientes minerais que são divididos em macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Mn, B, Fe, Mo, Zn, Cl e Ni), conforme sua concentração relativa no tecido vegetal (MENGEL; KIRKBY, 1987).

Nas plantas, os nutrientes minerais podem ser encontrados em níveis baixo, adequado ou tóxico. Sob nível baixo, a adição de fertilizantes é capaz de produzir incrementos na produção. Quando os nutrientes são fornecidos adequadamente, encontra-se correlação entre crescimento, desenvolvimento e acúmulo de nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2009). Antes que

o nutriente se acumulem em excesso nos tecidos vegetais, causando toxidez, ocorre o consumo de luxo, faixa em que o aumento do teor de nutriente no tecido vegetal não se traduz em aumento de crescimento ou de produtividade (KURIHARA et al., 2005). De acordo com Hartz e Johnstone (2007), as faixas de teores adequados de macronutrientes para alface, em g kg^{-1} , são: N de 33 a 48, P de 3,5 a 7,5, K de 29 a 78, Ca de 6 a 11, Mg de 2,5 a 4,5, e S de 2,0 a 3,5; e de micronutrientes, em mg kg^{-1} , são: B de 24 a 36, Cu de 5,0 a 8,6, Fe de 115 a 257, Mn de 45 a 74 e Zn de 25 a 73.

Os nutrientes apresentam características intrínsecas importantes que ajudam a entender seu comportamento e a identificar problemas de deficiência e toxidez. Alguns elementos podem ser remobilizados das folhas velhas para as novas com facilidade (N, P, K, Mg, S, Cl e Ni), enquanto outros são imóveis nas plantas (Ca e B) e outros de mobilidade intermediária (Zn, Fe, Mn, Cu e Mo) (EPSTEIN, 1972; MARSCHINER, 1995). A mobilidade dos nutrientes permite a diagnose visual da deficiência nutricional, uma vez que o sintoma geralmente será visto nas folhas velhas, quando o elemento for móvel, e nas folhas novas, quando o elemento for imóvel. O sintoma é a expressão final da desordem metabólica, causada pelo suprimento inadequado do nutriente, ou seja, antes do aparecimento do sintoma visual o metabolismo e o crescimento da planta provavelmente já foram comprometidos (TAIZ; ZEIGER, 2009).

3.4.1.1 Função dos nutrientes (com ênfase apenas em Ca, Cu, Mn e Zn)

O cálcio é um macronutriente. Ele é absorvido como cátion divalente (Ca^{2+}) e sua translocação no floema é muito reduzida. Apresenta funções estrutural e metabólica, atuando na composição da parede celular e das membranas celulares (HEPLER; WINSHIP, 2010); manutenção do balanço de íons no vacúolo e ativação de algumas enzimas como α -amilase, fosfolipase e ATPases. Além disso, ele é mensageiro secundário na planta, atuando em resposta a estímulos do meio. O sintoma de deficiência mais comum em alfaces é o “tipburn”, caracterizado pela queima das bordas das folhas novas. Ocorre também necrose nas pontas das raízes (PETRAZZINI et al., 2014).

O cobre é absorvido nas formas Cu^{2+} ou Cu-quelato. Está envolvido em uma série de processos fisiológicos nas plantas: mobilização de ferro, metabolismo da parede celular, respiração mitocondrial, transporte fotossintético de elétrons e sinalização hormonal (AMEH; SAYES, 2019). A deficiência de Cu ocorre em folhas jovens tornando-as verde-escuras, enroladas, murchas, deformadas, e, posteriormente, com manchas necróticas. O

excesso induz estresse oxidativo nas plantas por meio da produção intensificada de espécies reativas de oxigênio (EROs).

O manganês é absorvido na forma de cátion Mn^{2+} . Na fotossíntese, exerce papel fundamental como cofator no processo de oxidação da água no FS II. O Mn realiza ainda funções na estrutura lamelar dos tilacoides dos cloroplastos, na síntese de clorofila e na ativação de enzimas. Pontos esbranquiçados que evoluem para cor amarelada são sintomas de deficiência. Formação de pontos marrons nas folhas, seguidos por cloroses que evoluem para necroses e queda das folhas (FECHT-CHRISTOFFERS et al., 2003) são sintomas de excesso de Mn.

Absorvido na forma Zn^{2+} , o zinco atua no transporte de energia, síntese de proteínas, proteção da estrutura de proteínas e estruturas da membrana celular (ARAVIND; PRASAD, 2004), produção do triptofano e na precursão das auxinas (principalmente do ácido indol-acético), fundamentais em processos de alongação celular. Folhas pequenas e encarquilhadas, clorose em folhas novas e redução do enraizamento são sintomas da deficiência de Zn (PETRAZZINI et al., 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Condições experimentais

Os experimentos foram realizados no Setor de Olericultura do Campus UFV-Florestal (19° 53' S, 44° 25' W, 776 m de altitude), em sistema hidropônico NFT comercial, instalado dentro de cultivo protegido por filme agrícola de polietileno azul com proteção UVa e UVb, e paredes de malha de sombreamento vermelhas 35%. A alface utilizada foi a cultivar Vanda®, do grupo crespa.

O sistema NFT foi constituído de oito bancadas, cada uma contendo quatro tubos de polipropileno trapezoidal R80 (Hidrogood®) com 18 orifícios por tubo, espaçados 30 cm entre si e entre tubos (Figura 1), com declividade de 4,20%. Cada bancada possuía um reservatório plástico de 250 L conectado a uma bomba de 33,85 W. As bombas foram ligadas a um timer que controlou a circulação da solução nutritiva de 15 em 15 minutos, das 05:30 h às 10:00 h e das 16:00 h às 18:00 h; 30 minutos de circulação e 15 minutos de intervalo, das 10:00 h às 16:00 h; e 15 minutos de circulação a cada 2 horas de intervalo, durante o período noturno.

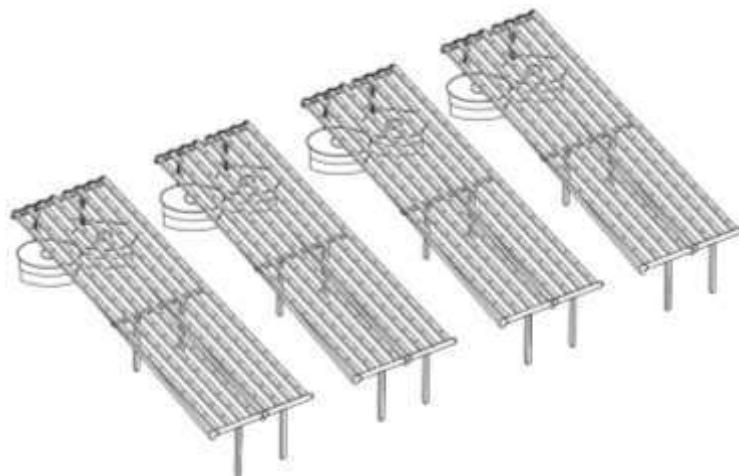


Figura 1 - Vista superior das bancadas NFT. Fonte: Autora.

4.2 Testes preliminares

4.2.1 Análises da água e das soluções nutritivas

Os testes de qualidade física, química e microbiológica da água utilizada no Setor de Olericultura são mensalmente realizados pelo Campus UFV - Florestal. Os resultados atestaram que os parâmetros de qualidade da água estão dentro dos limites para sua utilização na hidroponia (Tabela 1), dada à ausência de patógenos, e ao pH, teor de cloro e dureza em níveis admissíveis (BAILEY et al., 1999; FURLANI et al., 2009).

Tabela 1 – Média dos resultados dos testes físicos, químicos e microbiológicos da água do Setor de Olericultura do Campus UFV – Florestal

Parâmetros	Métodos	Unidades de medida	Resultados
Turbidez	ABNT MB 3227	NTU	0,3±0,06
Temperatura		°C	21,7±0,53
pH	ABNT NBR 14339	-	6,1±0,05
Cloro	SMEWW	mg L ⁻¹	0,4±0,04
Dureza total	SMEWW	mg L ⁻¹	13,6±2,04
Cloretos	SWWA4110B	mg L ⁻¹	7,4±0,60
Coliformes totais	SWWA9223B	P.A./100mL	ausente
Escherichia coli	SWWA9223B	P.A./100mL	ausente

Fonte: Laudos de análise pertencente ao Campus UFV - Florestal, média dos resultados de janeiro a setembro de 2019.

Foi realizada também análise da água para quantificar os teores dos nutrientes (Ca, Cu, Mn e Zn) naturalmente disponibilizados e avaliar a possibilidade de se realizar um experimento dessa natureza em sistema comercial de cultivo. A análise revelou baixo teor de Ca e de micronutrientes, com teores inclusive abaixo do limite de leitura do aparelho (Tabela 2).

Também foram feitas análises das soluções referentes à menor concentração testada (concentração de 0 ppm – tratamento controle) dos nutrientes estudados, exceto para Cu, pois devido à pandemia da COVID-19 o laboratório não conseguiu concluir os testes em tempo hábil, perdendo a validade da amostra. As soluções com o nutriente faltante mantiveram baixos os teores dos nutrientes estudados, o que sugere não ter havido contaminação no preparo das soluções nutritivas (Tabela 2).

Tabela 2 - Resultado do teor de nutrientes na água e nas soluções de menor concentração (0 ppm) do nutriente estudado

Amostras	Concentrações dos nutrientes (ppm) ¹			
	Ca total	Cu total	Mn total	Zn total
Água	4,150	<0,005	< 0,050	< 0,010
Solução 0 ppm Ca	4,740	0,068	0,490	0,010
Solução 0 ppm Mn	161,780	0,066	< 0,050	0,020
Solução 0 ppm Zn	141,780	0,070	0,450	< 0,010

¹ Standard methods for the examination of water and wastewater, 23th Edition, 2017. Fonte: Laboratório de Análises BioÁgua, Contagem, MG.

4.2.2 Análises de substratos

Embora esse trabalho tenha proposto avaliar soluções nutritivas em sistema comercial, o máximo de cuidado foi tomado para evitar a entrada de nutrientes externos nos

experimentos. Assim, para evitar que o substrato pudesse se constituir em fonte de contaminação, alguns testes foram realizados visando escolher o mais inerte possível do ponto de vista de fornecimento dos nutrientes testados, sobretudo de micronutrientes.

O primeiro substrato testado foi o comercial HT Hortaliças[®]. As mudas foram fertirrigadas com solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950). Na última semana, receberam apenas irrigação, visando à lixiviação dos nutrientes, diminuindo, assim, a quantidade de nutrientes que seria levada ao sistema NFT pelo substrato. Entretanto, a análise mostrou elevado teor de nutrientes no substrato, inviabilizando seu uso (Tabela 3).

Tabela 3 - Teores de Ca, Cu, Mn e Zn nos substratos avaliados

Substratos	Teores de nutrientes			
	Ca (g L ⁻¹)	Cu (mg L ⁻¹)	Mn (mg L ⁻¹)	Zn (mg L ⁻¹)
Substrato HT Hortaliças ^{®1}	8,5020	19,1000	161,0000	36,6000
Fibra de coco Golden Mix ^{®1}	1,0980	16,6000	48,8000	13,3000
Areia lavada ¹	0,0800	0,3000	1,4000	0,5000
Espuma fenólica Green-up [®] (15 cubos em 2 L) ²	< 0,0005	0,0080	<0,0500	<0,0400

Métodos utilizados: ¹Titulação e absorção atômica; ²Standard methods for the examination of water and wastewater, 23th Edition, 2017. Fontes: ¹Laboratório de Análise de Solos Viçosa, Viçosa, MG e ²Laboratório de Análises BioÁgua, Contagem, MG.

O mesmo procedimento acima foi realizado com fibra de coco. O resultado mostrou redução de 87% no teor de Ca se comparado ao substrato HT Hortaliças[®], e reduções de 13%, 70% e 64% nos teores dos micronutrientes Cu, Mn e Zn, respectivamente (Tabela 3). Portanto, devido à redução no teor de Ca no substrato e maior requerimento desse nutriente pelas plantas, a fibra de coco mostrou-se adequada para o estudo com Ca.

Ainda, tentando encontrar um substrato com menor capacidade de retenção de micronutrientes, optou-se por lavar areia com água da torneira e deionizada. Embora a areia lavada tenha apresentado baixo teor dos nutrientes (Tabela 3), a produção de mudas na areia e o transplântio no sistema NFT não seria adequado. Isso, pois, a areia poderia danificar o sistema hidropônico, além de que a retirada da areia antes do transplântio poderia comprometer o sistema radicular das plântulas e favorecer o estresse hídrico, por não reter solução nutritiva quando o seu fluxo fosse interrompido. Além do mais, esse não é um substrato comercialmente utilizado em NFT.

Logo, foi realizado teste com espuma fenólica lavada conforme Rocha et al. (2000), pois é considerado substrato inerte (BEZERRA NETO; BARRETO, 2012) e de fácil aplicação no sistema NFT (FURLANI et al., 2009). Os teores dos nutrientes foram

consideravelmente reduzidos (Tabela 3), sendo esse, portanto, o substrato escolhido para os experimentos com micronutrientes.

4.2.3 Fertirrigação das mudas

Buscando melhor entendimento da nutrição das mudas de alface foram realizados alguns ensaios de produção de mudas reduzindo ou até mesmo omitindo o nutriente em estudo. Avaliou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas (DICKSON et al., 1960), parâmetro que considera o equilíbrio da distribuição da biomassa na planta (MEDEIROS et al., 2018) pela fórmula: $IQD = \text{peso de matéria seca total} / [(\text{altura/diâmetro do colmo}) + (\text{peso de matéria seca da parte aérea} / \text{peso de matéria seca das raízes})]$.

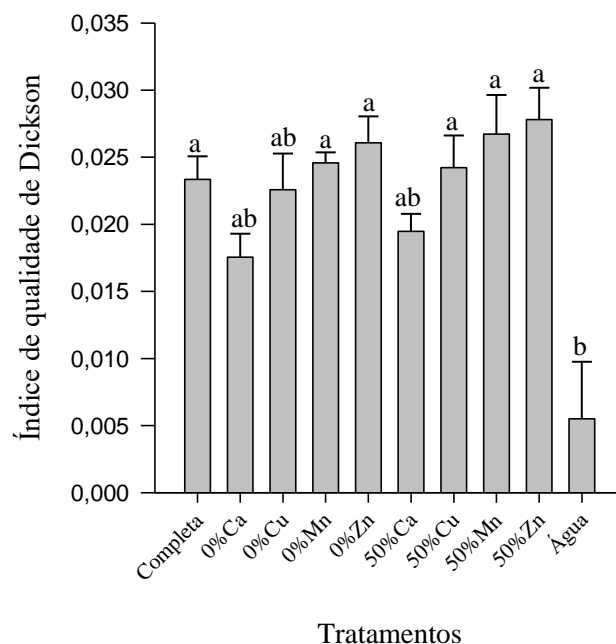


Figura 2 - Índice de qualidade de Dickson de mudas de alface produzidas com diferentes soluções nutritivas (Tratamentos). Completa: solução de Hoagland e Arnon (1950); 0% Ca, 0% Cu, 0% Mn, 0% Zn: solução de Hoagland e Arnon (1950) com 0% de Ca, Cu, Mn e Zn, respectivamente; 50% Ca, 50% Cu, 50% Mn, 50% Zn: solução com 50% do recomendado por Hoagland e Arnon (1950) para Ca, Cu, Mn e Zn, respectivamente. Barras seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade, (n=5).

Verificou-se que os nutrientes, mesmo o Ca, puderam ser omitidos sem afetar a qualidade da muda, pois o IQD (Figura 2) não indicou diferença entre mudas adubadas com solução completa e mudas com omissão completa ou parcial dos nutrientes estudados.

4.3 Soluções nutritivas

Foram realizados cinco experimentos. Nos quatro primeiros foram testadas concentrações de fertilizantes contendo nanopartículas de Ca, Cu, Mn e Zn, e, no último, foi

testada solução nutritiva formulada com as melhores concentrações desses fertilizantes. Os fertilizantes testados foram IcOnCalcium (52,91% p/v Ca), IcOnCopper (107,35% p/v Cu), IcOnManganese (72,11% p/v Mn) e IcOnZinc (146,66% p/v Zn). Os cinco experimentos utilizaram como base a solução nutritiva sugerida por Hoagland e Arnon (1950) (Tabela 4).

Para os experimentos com micronutrientes, utilizou-se a solução acima, variando suas concentrações: Cu 0,00, 0,01, 0,03, 0,06, 0,12, 0,24 e 0,47 ppm; Mn 0,00, 0,07, 0,15, 0,29, 0,58, 1,16 e 2,33 ppm, e Zn 0,00, 0,01, 0,02, 0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 ppm. Para o experimento com Ca, utilizou a solução de Hoagland e Arnon (1950) modificada (Tabela 4), uma vez que a substituição do nitrato de cálcio pelo nanofertilizante à base de Ca alterou a quantidade de N. Por isso, utilizou-se a solução acima, variando as concentrações de Ca em 0,0, 39,9, 79,8, 119,7, 159,6, 239,4 e 319,2 ppm. Para cálculo dessas concentrações levou-se em consideração que a concentração desses nutrientes comumente utilizadas são: 160, 0,075, 0,50 e 0,05 ppm de Ca, Cu, Mn e Zn, respectivamente (HOAGLAND; ARNON, 1950).

Os fertilizantes convencionais utilizados foram: Calcinit[®], Krista K[®], Krista Sop[®], Krista Map[®], Krista Mag[®], Krista MagS[®], sulfato de amônio, ácido bórico, sulfato de cobre, sulfato de manganês, sulfato de zinco, molibdato de sódio e Fe-EDTA Royalflex[®].

No quinto experimento foram testadas três soluções nutritivas. Solução 1 (S1): melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizantes isolados; Solução 2 (S2): concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais; Solução 3 (S3): concentrações recomendadas por Hoagland e Arnon (1950), aplicando fertilizantes convencionais (Tabela 4).

Tabela 4 – Concentração dos nutrientes na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) (S3), na solução utilizada no experimento com Ca e nas soluções dos experimentos com as melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizantes isolados (S1) e concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais (S2)

Soluções	Macronutrientes (ppm)						
	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
Hoagland e Arnon (1950) – S3	196	14	31	234	160,00	48,00	64
Experimento com Ca	114	32	31	234	*	49,38	53
S1	114	32	31	234	95,60	49,38	53
S2	114	32	31	232	96,00	47,70	130

Soluções	Micronutrientes (ppm)						
	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	
Hoagland e Arnon (1950) – S3	0,50	0,075	1	0,500	0,010	0,0500	
Experimento com Ca	0,50	0,075	1	0,500	0,010	0,0500	
S1	0,50	0,190	1	0,070	0,010	0,0047	
S2	0,50	0,190	1	0,070	0,010	0,0047	

*Variou conforme as concentrações testadas.

4.3.1 Experimento com cálcio

As sementes peletizadas da cultivar Vanda® foram semeadas em bandejas de 200 células contendo fibra de coco umedecida. Após o semeio, as bandejas foram irrigadas até completa saturação e permaneceram em ambiente escuro, por dois dias, para embebição das sementes, sendo posteriormente transferidas para estufa agrícola. A partir do 9º dia após a semeadura (DAS), as plantas receberam três fertirrigações por semana com solução padrão de Hoagland e Arnon (1950). Aos 26 DAS, as plantas com quatro folhas foram transplantadas para o sistema NFT.

4.3.2 Experimentos com micronutrientes

Para estudo dos micronutrientes foram utilizadas espumas fenólicas lavadas conforme metodologia proposta por Rocha et al. (2000), até pH entre 5,5 e 6,5. Em seguida, retirou-se seu excesso de água e fez-se o semeio. As espumas fenólicas permaneceram no escuro por dois dias, quando, então, foram para estufa agrícola. Com base nos ensaios

preliminares, o micronutriente em estudo foi suprimido da solução nutritiva durante a produção de mudas. Foram feitas seis fertirrigações e uma irrigação da espuma fenólica por semana. Foi utilizada solução de Hoagland e Arnon (1950) modificada, iniciando-se com 25% da concentração, depois com 50%. Aos 15 DAS, as mudas foram transplantadas para a bancada NFT, com apoio de copos de poliestireno expandido de 70 mL, não passando pela fase de berçário (Figura 3).



Figura 3 - Fotos das plântulas e transplântio. A – plântulas na fibra de coco, B – mudas transplantadas, C – plântulas na espuma fenólica, D – mudas transplantadas com apoio de copos de poliestireno expandido.

4.3.3 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes

Nesse experimento foi adotada a mesma metodologia para os experimentos com micronutrientes, sendo suprimidos da solução todos os nutrientes em estudo durante a formação das mudas. Foram testadas três soluções nutritivas: Solução 1 (S1): melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizantes isolados; Solução 2 (S2): concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais; e Solução 3 (S3): concentrações recomendadas por Hoagland e Arnon (1950), aplicando fertilizantes convencionais.

4.4 Manejo da solução e condução das plantas

Foram monitorados diariamente o pH da solução nutritiva, utilizando-se peagâmetro modelo mPA210, e a CE, por meio de condutivímetro modelo Tec-4MP. Os valores de pH foram mantidos na faixa de 5,5 a 6,5, adicionando-se soluções de HCl ou NaOH (MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004). A CE foi mantida na faixa de 1,5 a 2,0 mS cm⁻¹ (MARTINEZ; SILVA FILHO, 2004), sendo a reposição dos nutrientes feita com solução estoque. O preparo das soluções nutritivas do experimento com Ca dispensou a solução estoque de Ca, uma vez que o nanofertilizante testado é líquido e foi diretamente despejado no reservatório, sendo necessária agitação da solução nutritiva para sua dissolução. Nas maiores concentrações testadas houve maior aumento do pH devido à natureza do nanofertilizante (carbonato). Para os experimentos com micronutrientes, foi necessária diluição dos nanofertilizantes para facilitar o preparo das soluções estoques, uma vez que os produtos são muito concentrados.

As plantas receberam a solução nutritiva, conforme os tratamentos, até atingirem padrão comercial para colheita, definido como sendo 20 folhas maiores que 10 cm de comprimento, o que ocorreu, via de regra, entre o 30° e 35° dia após o transplantio (DAT).

A temperatura e a umidade relativa do ar no interior da estufa agrícola foram monitoradas com termômetro de máxima e mínima do tipo capela e termo-higrômetro analógico, respectivamente (Figura 4). A umidade relativa foi medida entre 11:00 h e 12:00 h.

No experimento com Ca a umidade relativa do ar foi de 66,5%±3,5% e a temperatura variou de 15,3°C±2,3°C (média das mínimas) a 30,1°C±2,7°C (média das máximas); durante o experimento com Cu a umidade relativa atingiu 78,2%±1,5% e a temperatura variou de 19,0°C±2,1°C a 31,3°C±3,1°C; no experimento com Mn a umidade relativa apresentou a menor variação com média de 55,8%±1,1% e a temperatura variou de 12,7°C±3,4°C a 27,8°C±1,9°C; no experimento com Zn a umidade relativa foi de 57,3%±2,6% e a temperatura variou entre 11,0°C±1,6°C e 28,5°C±1,9°C, e no último experimento a umidade relativa foi de 76,0%±1,5% e a temperatura variou de 18,5°C±1,8°C a 30,4°C±3,8°C (Figura 4).

O controle fitossanitário foi feito com base nas observações das plantas, removendo as que apresentaram sinais de doenças. O controle de insetos-praga na estufa foi realizado com armadilhas adesivas na base das bancadas e catação manual. Foram feitas limpeza e desinfecção do sistema NFT a cada novo experimento.

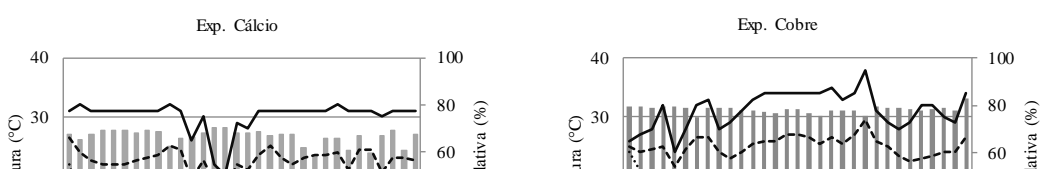


Figura 4 - Variações da temperatura mínima (T min), média (T med) e máxima (T max), e da umidade relativa do ar durante o período de experimento com Ca, entre 13 de setembro e 14 de outubro; com Cu, entre 28 de fevereiro e 29 de março; com Mn, entre 30 de abril e 03 de junho; com Zn ,entre 18 de junho e 20 de julho; e durante o experimento final, entre 20 de outubro e 19 de novembro.

4.5 Avaliações

4.5.1 Análise de crescimento

Para os experimentos de definição de concentração de cada nutriente foram realizadas medidas de crescimento iniciando-se no transplântio, e, após, a cada cinco dias até a colheita. Em cada época de coleta foram amostradas três plantas aleatoriamente em cada bancada. Após a coleta foram determinadas a área foliar (AF) através do medidor de área foliar modelo LI-3000 C, o número total de folhas maiores que 2,0 cm de comprimento (NTF), número de folhas com padrão comercial (maiores que 10 cm) (NF>10 cm), massas das matérias frescas das folhas (MFF) e caule, e, somando essas massas, obteve-se a massa da matéria fresca da parte aérea (MFPA). Em seguida, as plantas foram secas em estufa com

circulação forçada de ar, a 70°C, por 3 dias para determinação das massas de matérias secas de folhas (MSF) e da parte aérea (MSPA).

Esses dados foram utilizados para análise de crescimento. Foram estimados, conforme Benincasa (2003), os seguintes parâmetros: razão de área foliar (RAF = AF/MSPA) em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, área foliar específica (AFE = AF/MSF) em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, taxa de crescimento absoluto (TCA = $(\text{MSPA}_{t_2} - \text{MSPA}_{t_1}) / (t_2 - t_1)$) em g/planta/dia, taxa de crescimento relativo (TCR = $(\ln \text{MSPA}_{t_2} - \ln \text{MSPA}_{t_1}) / (t_2 - t_1)$) em $\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ e taxa de assimilação líquida (TAL = $(\text{MSPA}_{t_2} - \text{MSPA}_{t_1}) (\ln \text{AF}_{t_2} - \ln \text{AF}_{t_1}) / (t_2 - t_1) (\text{AF}_{t_2} - \text{AF}_{t_1})$) em $\text{mg cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Onde: t_1 = coleta no tempo 1 (dias), t_2 = coleta no tempo 2 (dias).

Para o experimento com as melhores concentrações de todos os nutrientes (Ca, Cu, Mn e Zn) realizou-se uma única coleta ao final do experimento, procedendo-se às mesmas medidas de crescimento absoluto supracitadas.

4.5.2 Trocas gasosas

As avaliações de trocas gasosas foram realizadas antes do encerramento de cada experimento, com exceção do experimento com Zn, pois não havia equipamento disponível. Utilizou-se o analisador de gases no infravermelho – IRGA (modelo LiCor 6400 XT, LICOR, Lincoln, EUA), em sistema aberto, com luz saturante artificial ($900 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração ambiente de CO_2 . Foram medidas a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (E), e estimadas a eficiência instantânea do uso da água (A/E) e a relação entre as concentrações interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). As avaliações foram realizadas na quarta folha completamente expandida a partir do ápice. As medições ocorreram entre as 7:46 h e as 9:07 h no experimento com Ca, entre as 8:46 h e as 10:09 h no experimento com Cu, entre as 12:30 e as 14:26 h no experimento com Mn e entre as 10:14 h e as 11:25 no experimento final.

4.5.3 Análise dos teores foliares de pigmentos

Na mesma data de avaliação de trocas gasosas, foi coletado, às 13:00 h, material para quantificar os teores foliares de pigmentos pelo método da espectrofotometria descrito por Arnon (1949). Foram coletados dois discos foliares de diâmetro conhecido (1,0 cm) por planta, e o material foi imediatamente congelado e armazenado em nitrogênio líquido até análise.

Os discos coletados foram triturados sob luz verde usando como extrator acetona 80%, e o homogenato foi filtrado em papel de filtro diretamente em balão volumétrico de 25

mL, revestido por papel alumínio. Depois, uma alíquota desse material foi levada ao espectrofotômetro de duplo feixe para leitura a 470,0, 646,8 e 663,2 nm. Os resultados da leitura foram aplicados nas equações de Lichtenthaler (1987) para determinar os teores de clorofilas a, b, totais e carotenoides.

4.5.4 Avaliação do estado nutricional

A parte aérea das plantas da última coleta de cada experimento (quatro plantas por tratamento) foi lavada primeiramente com água da torneira e depois com água deionizada. Após secas em estufa conforme descrito acima, as amostras foram trituradas em moinho tipo Willey com câmara de aço inoxidável e peneiras de 1,0 mm de diâmetro (40 mesh) e encaminhadas para análise, onde sofreram digestão nítricoperclórica (MALAVOLTA et al., 1997). Para Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn foram realizadas leituras através do espectrômetro de absorção atômica (SARRUGE; HAAG, 1974). A determinação de P se deu em espectrofotômetro de absorção molecular (BRAGA; DEFELIPO, 1974). A quantificação de K foi através de emissão de luz no fotômetro de chama (MALAVOLTA et al., 1997). O S e B foram determinados em espectrofotômetro. O N foi determinado através do método de Kjeldahl (MALAVOLTA et al., 1997).

4.6 Análises estatísticas

4.6.1 Experimentos para definições de concentrações

Cada experimento foi analisado separadamente. Foi utilizado delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcelas subdivididas, sendo as concentrações alocadas nas parcelas e as épocas de avaliação nas subparcelas.

4.6.1.1 Obtenção das concentrações de cada nutriente

Para as variáveis de crescimento realizou-se a anova em esquema de parcelas subdivididas para verificar a interação da concentração do nutriente com as épocas de coleta para as variáveis de crescimento. Para interações significativas procurou-se ajustar superfícies de respostas. Os modelos foram escolhidos com base na lógica biológica, na significância dos parâmetros da regressão e nos maiores valores de coeficiente de determinação (R^2), utilizando o software SigmaPlot 11.0 (SIGMAPLOT, 2008). Quando não foi possível encontrar um modelo tridimensional, foram ajustadas curvas simples (em função

da concentração ou da época de coleta) que melhor representaram o comportamento de cada variável.

Com as equações geradas, apenas para as variáveis absolutas de crescimento, foram estimadas as concentrações que promoveram o máximo crescimento (C100), substituindo-se na equação ajustada o valor de x (concentração, em ppm) com y (época de coleta, em dias) fixado na última coleta daquele ciclo. Adicionalmente, foi calculada a concentração do nutriente correspondente a 90% do crescimento máximo da variável (C90). Para definir a melhor concentração de cada fertilizante foi realizada a média das C90 de todas as variáveis, quando o modelo permitiu.

4.6.1.2 Trocas gasosas, teores foliares de pigmentos e teores de macro e micronutrientes

As análises de trocas gasosas foram realizadas em blocos casualizados, com cinco repetições, enquanto os teores de pigmentos fotossintéticos e teores de nutrientes foram analisados em delineamento inteiramente casualizado, com cinco e quatro repetições, respectivamente. Com a MSPA e teores dos nutrientes, calculou-se o conteúdo de nutrientes. Os dados foram submetidos às análises de variância e regressão, visando ao ajuste de equações que relacionaram cada variável às concentrações do nutriente. Para as variáveis que não foi possível encontrar um modelo com base na lógica biológica, significância dos parâmetros da regressão e valores de coeficiente de determinação (R^2) altos, apresentou-se a sua média. Para a análise estatística foi utilizado o programa R Studio (R CORE TEAM, 2019) e para regressão o software SigmaPlot 11.0 (SIGMAPLOT, 2008).

4.6.2 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes

No quinto experimento foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado para as variáveis de crescimento, teores foliares de pigmentos e de nutrientes; e o de blocos casualizados para os parâmetros de trocas gasosas, todos com oito repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

5. RESULTADOS

5.1 Experimento com Ca

5.1.1 Crescimento

A interação entre concentração de Ca e épocas de coleta foi significativa para todas as variáveis, exceto para MFPA e para TCA (Tabela 5). Todavia, foi possível encontrar modelos de superfícies de resposta apenas para as variáveis MFF, MSF, MSPA e AF (Figura 5 e Tabela 6). Observou-se incremento dessas variáveis ao longo do tempo e o efeito quadrático das concentrações de Ca, sobretudo nos últimos dias de experimento. Para as demais variáveis ajustaram-se regressões em função da concentração (Figura 6) e do tempo (Figura 7), separadamente.

Apenas a MFPA variou de forma quadrática em função das concentrações (Figura 6). Em função da época de coleta, a MFPA, NTF e TCA mostraram crescimento sigmoidal, enquanto a TCR e a TAL atingiram valores máximos próximos aos 15 DAT (Figura 7).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância das variáveis de crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Ca e épocas de coleta após o transplântio

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		MFF	MFPA	MSF	MSPA
Concentração (A)	6	1,12x10 ^{4**}	5,56x10 ^{4*}	29,17**	36,32**
Erro a	21	392,00	3,79x10 ⁴	2,59	3,34
Época (B)	7	2,22x10 ^{5**}	4,76x10 ^{5**}	906,56**	1245,92**
AB	42	2189,00**	5,60x10 ^{4 ns}	6,67**	8,46**
Erro b	98	440,00	5,47 x10 ⁴	3,13	4,06
C.V. (%) – A		21,52	160,38	28,12	160,38
C.V. (%) – B		22,78	192,81	30,90	192,81
		NTF	AF	AFE	RAF
Concentração (A)	6	42,84**	8,63x10 ^{6*}	1,52x10 ^{4**}	2,22x10 ^{4**}
Erro a	21	2,85	2,97x10 ⁵	1721,00	1140,00
Época (B)	7	2640,83**	1,44x10 ^{8**}	7,77x10 ^{4**}	8,14x10 ^{4**}
AB	42	7,16**	1,70x10 ^{6**}	5334,00**	5228,00**
Erro b	98	3,82	2,89x10 ⁵	2571,00	1836,00
C.V. (%) – A		11,29	22,76	9,23	8,39
C.V. (%) – B		13,07	22,47	11,28	10,64
		TCA	TCR	TAL	
Concentração (A)	6	0,27 ^{ns}	6,81x10 ^{-4 ns}	0,00263 ^{ns}	
Erro a	21	0,15	8,58x10 ⁻⁴	0,01	
Época (B)	7	5,46**	0,10**	0,58**	
AB	42	0,21 ^{ns}	0,007**	0,04*	
Erro b	98	0,27	3,01x10 ⁻³	0,02	
C.V. (%) – A		69,50	19,57	25,74	
C.V. (%) – B		93,23	37,13	41,29	

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; TCA: taxa de crescimento absoluto; TCR: taxa de crescimento relativo; TAL: taxa de assimilação líquida; C. V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

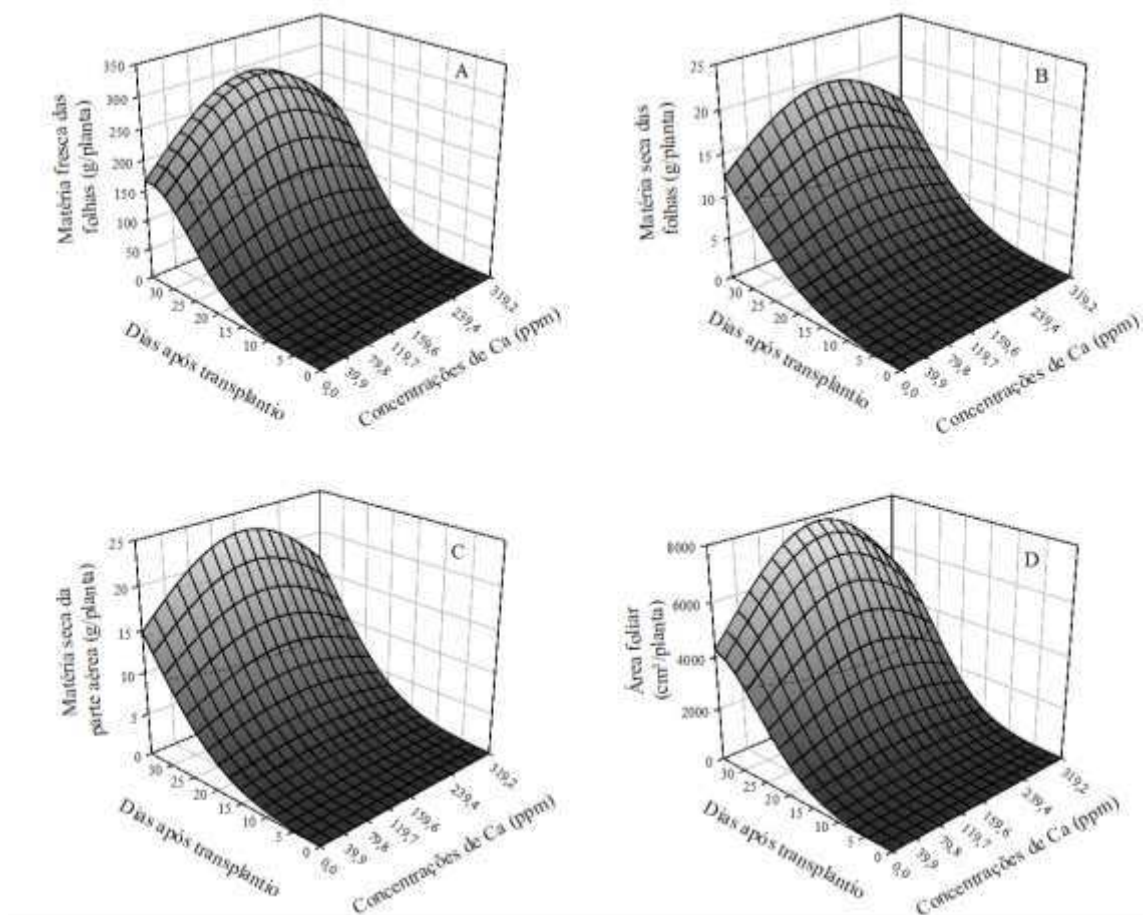


Figura 5 - Crescimento de plantas de alface em função da concentração de Ca e da época de coleta após o transplântio. A - matéria fresca de folhas; B - matéria seca de folhas; C - matéria seca da parte aérea e D - área foliar. Os modelos de regressão são apresentados na Tabela .

Tabela 6 – Equações de regressão ajustadas para as variáveis de crescimento da alface em função das concentrações de Ca (x, em ppm) e da época de coleta (y, em dias após o transplântio), e o coeficiente de determinação

Variáveis	Equações de regressão	R ²
MF	$\hat{Y} = 292,36^{**}\exp(-0,5(((x-180,83^{**})/170,76^{**})^2 + ((y-33,97^{**})/8,64^{**})^2))$	96,45
MSF	$\hat{Y} = 24,91^{**}\exp(-0,5(((x-175,26^{**})/183,86^{**})^2 + ((y-44,46^{**})/13,45^{**})^2))$	96,81
MSPA	$\hat{Y} = 31,86^{**}\exp(-0,5(((x-172,20^{**})/184,73^{**})^2 + ((y-46,16^{**})/13,66^{**})^2))$	97,21
AF	$\hat{Y} = 7873,52^{**}\exp(-0,5(((x-180,60^{**})/163,69^{**})^2 + ((y-36,18^{**})/10,18^{**})^2))$	96,19

MF: matéria fresca de folhas; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea e AF: área foliar. ** Significativo a 1% pelo teste F.

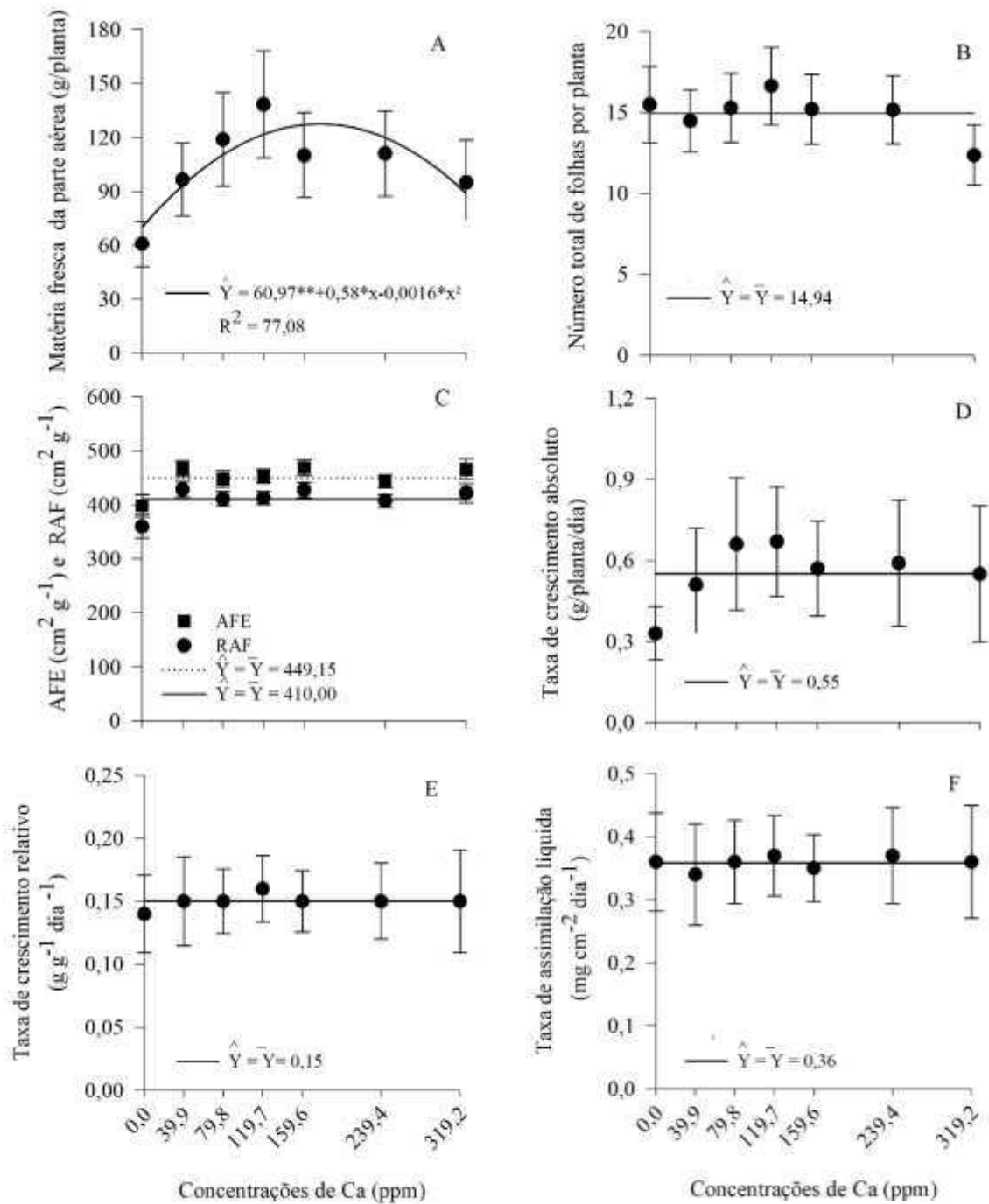


Figura 6 - Comportamento das variáveis de crescimento em função das concentrações de Ca, independentemente das épocas de avaliação. A – matéria fresca da parte aérea; B – número total de folhas; C - área foliar específica (AFE) e razão de área foliar (RAF); D – taxa de crescimento absoluto; E - taxa de crescimento relativo e F – taxa de assimilação líquida. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

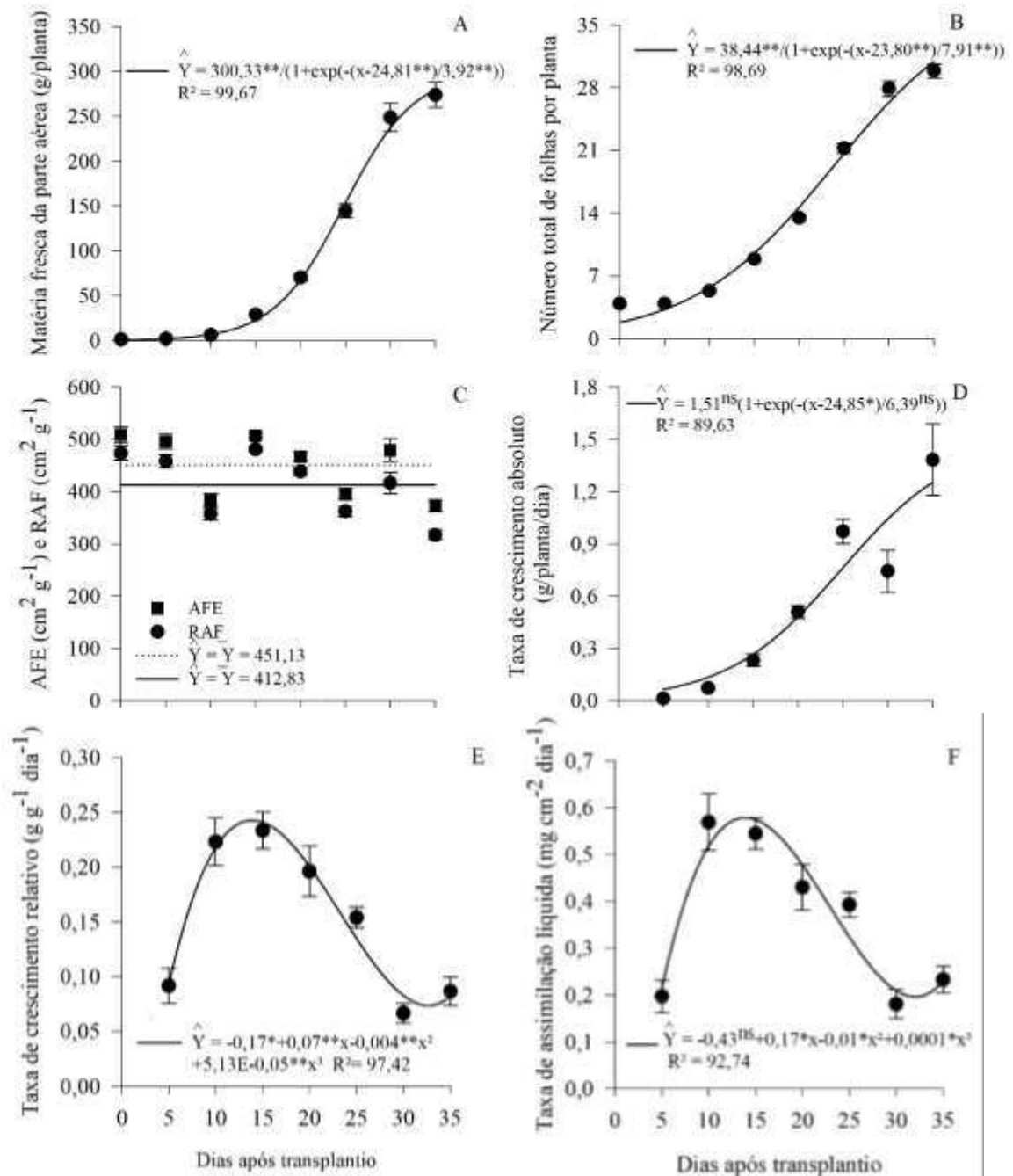


Figura 7 – Crescimento das plantas de alface em função das épocas de coleta após o transplântio, independentemente da concentração de Ca na solução. A – matéria fresca da parte aérea; B – número total de folhas; C – área foliar específica (AFE) e razão área foliar (RAF); D – taxa de crescimento absoluto; E – taxa de crescimento relativo e F – taxa de assimilação líquida. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

As concentrações de Ca necessárias para se atingir 100% de crescimento (C100) variaram de 172,20 ppm (para MSPA) até 180,80 ppm (para MFF), ao passo que as concentrações para se atingir 90% do máximo crescimento (C90) variaram de 87,40 ppm (para MSPA) a 105,45 ppm (para AF) (Tabela 7). Verificou-se, portanto, que as

concentrações C100 e C90 médias ocorreram, respectivamente, nas concentrações de 172,18 ppm e 95,60 ppm de Ca.

Tabela 7 – Concentrações de Ca na solução nutritiva necessárias para se atingir 100% (C100) e 90% (C90) do máximo crescimento absoluto de cada variável (MCV) da planta de alface

Variáveis	C100 (ppm)	C90 (ppm)	MCV
Matéria fresca de folhas (g/planta)	180,80	102,45	290,29
Matéria fresca de parte aérea (g/planta)	173,30	91,90	127,21
Matéria seca de folhas (g/planta)	175,20	90,82	19,45
Matéria seca de parte aérea (g/planta)	172,20	87,40	22,82
Área foliar (cm ² /planta)	180,60	105,45	7.820,80
Médias	172,18	95,60	-

5.1.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos

Houve efeito significativo ($p < 0,01$) das concentrações de Ca isoladamente apenas sobre A/E, C_i/C_a e clorofilas a e totais (Tabela 8), mas não foi possível encontrar um modelo de regressão que explicasse o fenômeno biológico (Figura 8).

Tabela 8 – Resumo da análise de variância referente à taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência instantânea no uso de água (A/E), relação entre as concentrações interna e externa de CO₂ (C_i/C_a) e dos teores foliares de pigmentos fotossintéticos em plantas de alface em função das concentrações de Ca na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios				
		Trocas gasosas				
		A	g _s	E	A/E	C _i /C _a
Bloco	4	36,05**	6,58x10 ^{3ns}	6,76 ^{ns}	0,05 ^{ns}	5,07x10 ^{-3**}
Tratamento	6	36,91 ^{ns}	8,71x10 ^{3ns}	1,03 ^{ns}	0,66**	1,13x10 ^{-2**}
Resíduo	24	5,26	1,64x10 ⁴	1,75	0,06	9,02x10 ⁻⁴
C.V. (%)		23,64	30,20	18,76	18,12	3,6
		Teores foliares de pigmentos				
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas totais	Carotenoides	
Tratamento	6	3,83x10 ^{-3**}	2,64x10 ^{-3ns}	0,01**	8,58x10 ^{-5ns}	
Resíduo	28	7,99x10 ⁻⁴	1,08x10 ⁻³	3,37x10 ⁻³	1,31x10 ⁻⁵	
C.V. (%)		24,08	49,9	31,04	28,02	

C.V.: coeficiente de variação. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Assim, os valores médios de A, g_s, E, A/E e C_i/C_a foram respectivamente de 9,70 μmol m⁻² s⁻¹, 424,00 mmol m⁻² s⁻¹, 7,05 mmol m⁻² s⁻¹, 139 μmol mmol⁻¹ e 0,84; e os teores foliares de clorofila a, b, totais e de carotenoides foram respectivamente de 0,12, 0,07, 0,19 e 0,03 g m⁻².

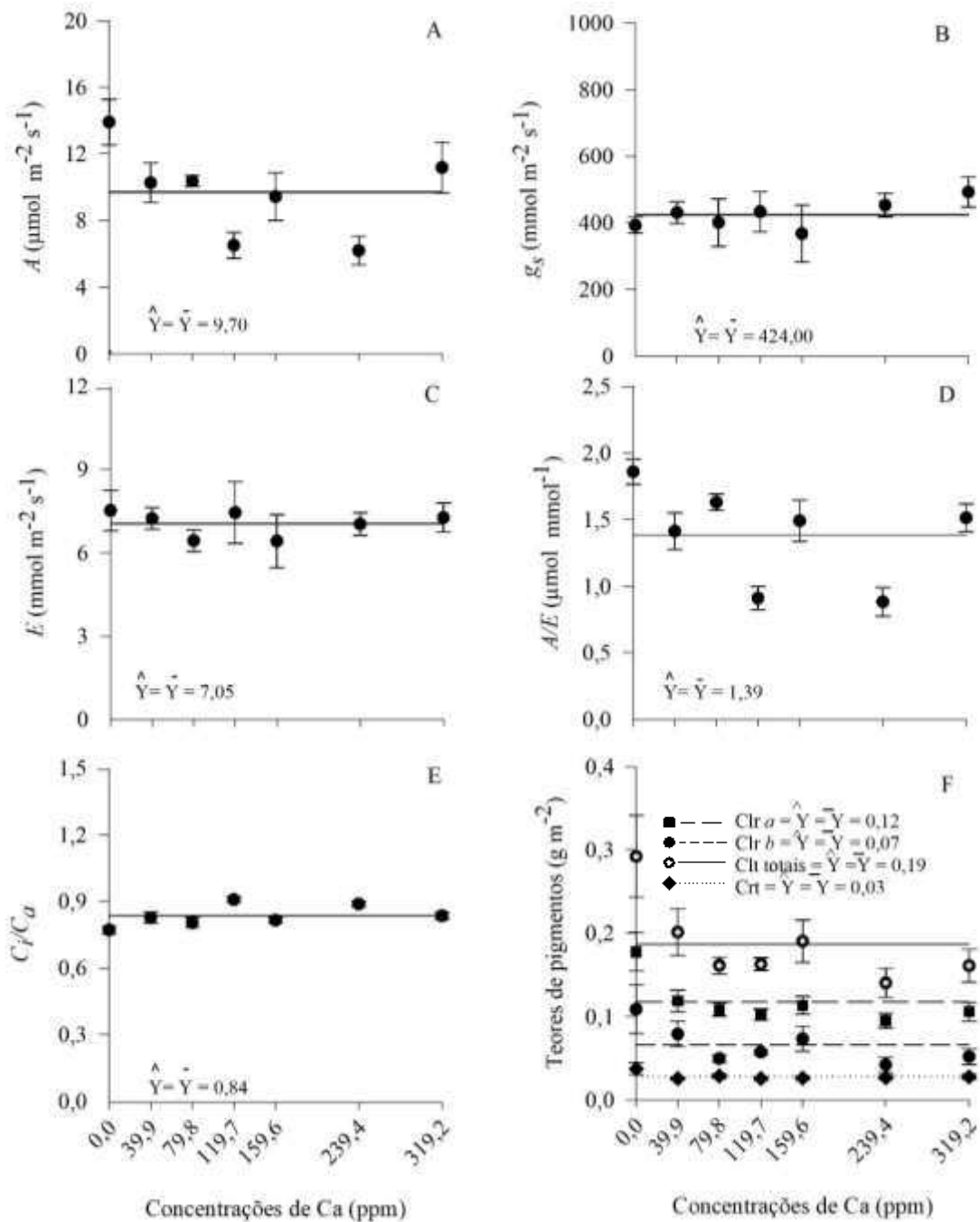


Figura 8 – Efeito das concentrações de Ca sobre as trocas gasosas e teores foliares de pigmentos de plantas de alface avaliadas aos 27 dias pós o transplântio. A - assimilação líquida de CO₂ (A); B - condutância estomática (g_s); C - transpiração (E); D - eficiência instantânea do uso da água (A/E); E - relação C_i/C_a e F- teores foliares de pigmentos (Clr a: clorofila a; Clr b: clorofila b; Clr totais: clorofilas totais; Crt: carotenoides).

5.1.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Houve efeito significativo ($p < 0,01$) das concentrações de Ca sobre os teores de nutrientes, exceto para N e K (Tabela 9). Os teores de Ca e S ajustaram-se estatisticamente ao modelo exponencial e o de Cu ao modelo sigmoidal (Figuras 9 e 10). Enquanto o teor de Ca nas plantas aumentou com o aumento de Ca na solução nutritiva, atingindo o teor máximo

(12,72 g kg⁻¹) na concentração de 236,90 ppm, os teores de S e Cu diminuíram. Para os demais nutrientes não foi possível ajustar modelo de regressão. Os teores médios de N, P, K e Mg foram respectivamente de 31,44, 6,49, 47,49 e 5,35 g kg⁻¹ (Figura 9) e os de Zn, Fe, B e Mn foram de 19,43, 86,81, 75,34 e 105,37 mg kg⁻¹ (Figura 10).

Tabela 9 – Resumo da análise de variância dos teores médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento da colheita, em função de diferentes concentrações de Ca na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios					
		Teores de macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Trat.	6	8,53 ^{ns}	2,67 ^{**}	0,04 ^{ns}	70,68 ^{**}	16,54 ^{**}	0,50 ^{**}
Resíduo	21	2,84	0,13	0,16	1,04	0,34	0,08
C.V. (%)		5,36	5,53	8,79	11,90	10,86	13,28
		Teores de micronutrientes					
		Zn	Fe	Mn	B	Cu	
Trat.	6	837,08 ^{**}	580,46 ^{**}	1574,62 ^{**}	1749,86 ^{**}	4,85 ^{**}	
Resíduo	21	7,66	103,83	68,88	42,72	0,34	
C.V. (%)		14,25	12,01	7,88	8,67	11,64	

C.V.: coeficiente de variação. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

Houve efeito significativo das concentrações de Ca sobre os conteúdos de Ca, Mg, Zn, B e Cu (Tabela 10). Entretanto, apenas para o conteúdo de Ca foi possível ajustar modelo de regressão (Figuras 9 e 10). O conteúdo de Ca nas plantas respondeu de forma quadrática ao aumento da concentração de Ca na solução nutritiva, atingindo o conteúdo máximo (0,2682 g/planta) na concentração de 223,19 ppm.

Tabela 10 - Resumo da análise de variância dos conteúdos médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento de colheita, em função de diferentes concentrações de Ca na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		Conteúdos de macronutrientes		
		N	P	K
Tratamento	6	0,05 ^{ns}	1,22x10 ^{-3ns}	0,13 ^{ns}
Resíduo	21	0,03	9,90x10 ⁻⁴	0,06
C.V. (%)		25,71	24,87	27,04
		Conteúdos de macronutrientes		
		Ca	Mg	S
Tratamento	6	0,03**	2,37x10 ^{-3**}	1,95x10 ^{-4ns}
Resíduo	21	2,72x10 ⁻³	5,00x10 ⁻⁴	9,90x10 ⁻⁵
C.V. (%)		29,29	22,61	24,95
		Conteúdos de micronutrientes		
		Zn	Fe	Mn
Tratamento	6	0,52**	0,63 ^{ns}	0,17 ^{ns}
Resíduo	21	0,03	0,26	0,24
C.V. (%)		41,87	30,38	24,67
		Conteúdos de micronutrientes		
		B	Cu	
Tratamento	6	0,22*	3,33x10 ^{-3*}	
Resíduo	21	0,08	1,08x10 ⁻³	
C.V. (%)		19,86	33,59	

C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F;
^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

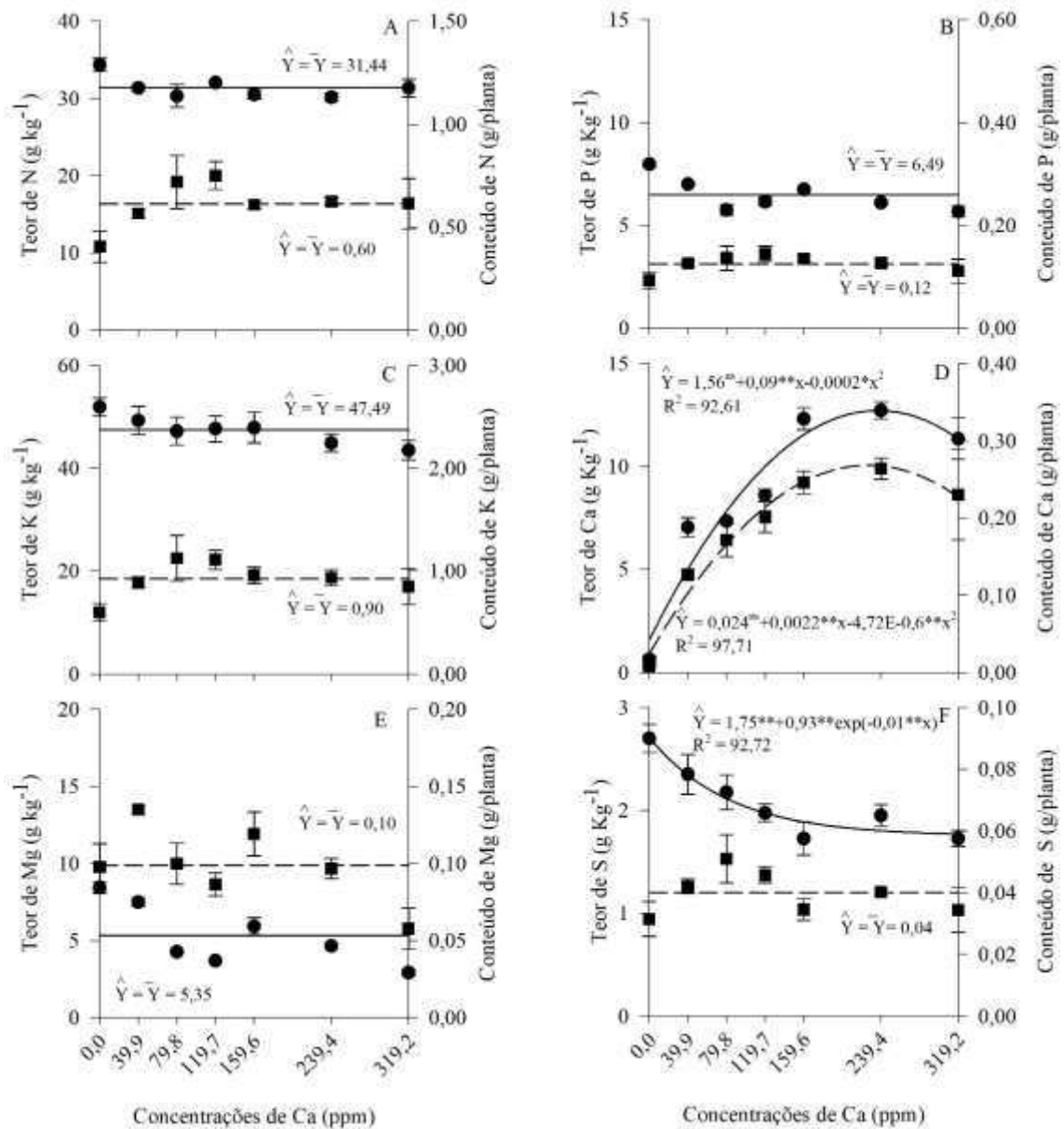


Figura 9 - Teores e conteúdos de macronutrientes da parte aérea de plantas de alface submetidas a diferentes concentrações de Ca. A – nitrogênio; B – fósforo; C – potássio; D – cálcio; E – magnésio e F – enxofre. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

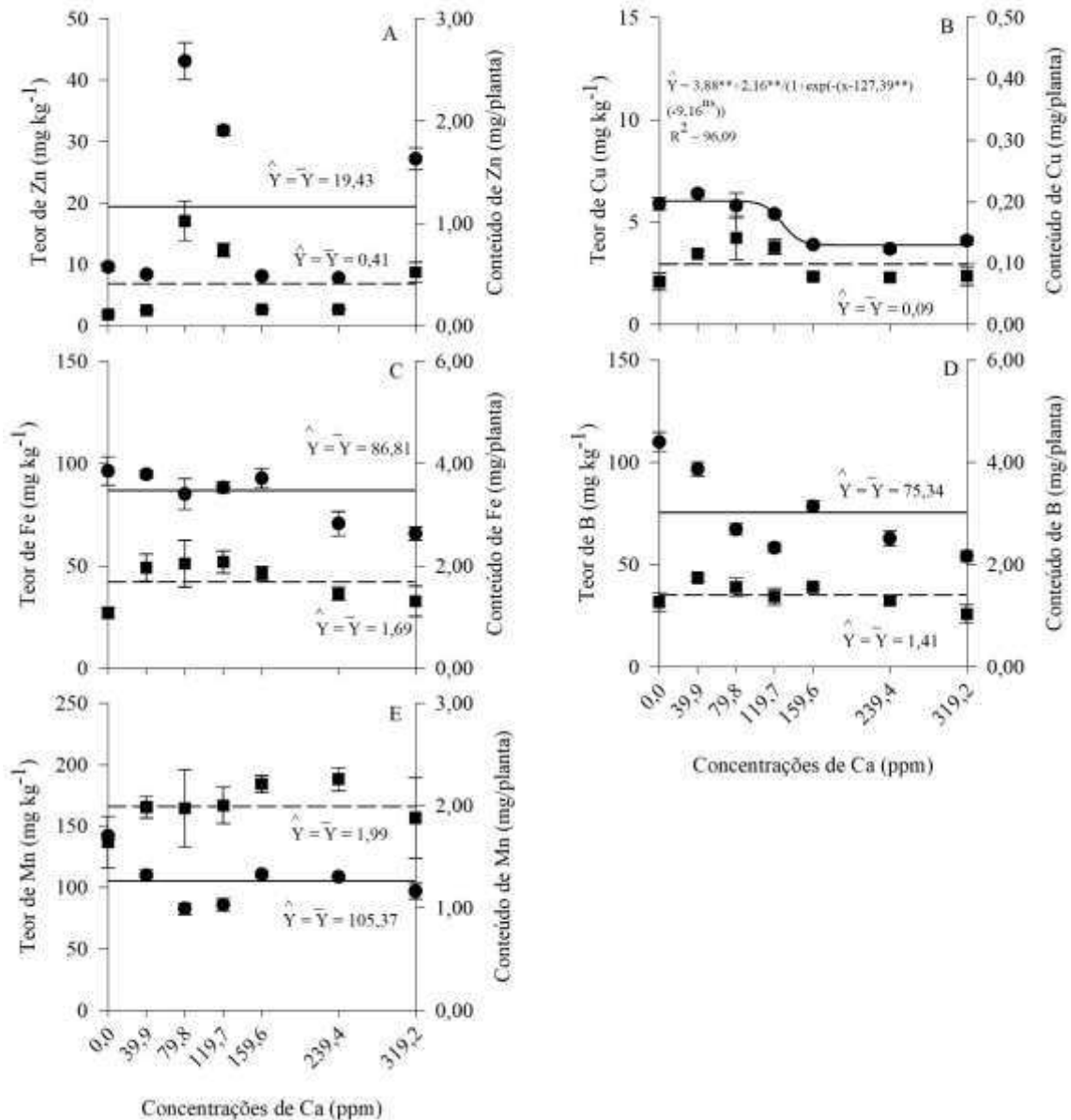


Figura 10 - Teores e conteúdo de micronutrientes da parte aérea de plantas de alface submetidas a diferentes concentrações de Ca. A – zinco; B – cobre; C – ferro; D – boro e E – manganês. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

5.2 Experimento com Cu

5.2.1 Crescimento

A interação entre concentrações e épocas de coleta foi significativa para todas as variáveis (Tabela 11). Assim, com base nas superfícies de respostas (Figura 11) e nas equações ajustadas (Tabela 12) foi possível verificar que a maioria das variáveis aumentou com a idade da planta e até certa concentração de Cu. Para AFE e RAF não foi possível ajustar modelos de superfícies de respostas, nem regressões em função da concentração e do

tempo separadamente. A TCR e TAL atingiram valores máximos próximo aos e 15 DAT, depois decresceram.

Tabela 11 – Resumo da análise de variância das variáveis de crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Cu e épocas de coleta após o transplântio

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		MFF	MFPA	MSF	MSPA
Concentração (A)	6	9454,00**	1,18 x10 ^{4**}	11,87**	15,44**
Erro a	21	93,00	114,00	0,37	0,46
Época (B)	7	9,72 x10 ^{4**}	1,16x10 ^{5**}	219,32**	263,85**
AB	42	2243,00**	2922,00**	2,21**	2,91**
Erro b	98	39,00	45,00	0,13	0,15
C.V. (%) – A		19,20	19,62	22,77	23,39
C.V. (%) – B		12,36	12,32	12,70	13,58
		NTF	NF> 10 cm	AF	AFE
Concentração (A)	6	47,89**	42,25**	6,72x10 ^{6**}	2,56 x10 ^{4**}
Erro a	21	2,08	1,78	1,50x10 ⁵	1893,00
Época (B)	7	1440,58**	1003,53**	7,60 x10 ^{7**}	8,73x10 ^{5**}
AB	42	8,74**	6,28**	1,73 x10 ^{6**}	1,32 x10 ^{4**}
Erro b	98	0,73	0,62	3,95 x10 ⁴	2496,00
C.V. (%) – A		14,13	23,15	27,74	7,54
C.V. (%) – B		8,36	13,66	14,24	8,66
		RAF	TCA	TCR	TAL
Concentração (A)	6	1,82x10 ^{4**}	0,08**	1,46x10 ^{-3*}	0,00342*
Erro a	21	1682,00	3,62x10 ⁻³	2,14x10 ⁻⁴	0,002
Época (B)	7	9,26x10 ^{5**}	1,15**	0,28**	1,07**
AB	42	9861,00**	0,03**	0,007**	0,04**
Erro b	98	2240,00	0,01	2,00x10 ⁻³	0,01
C.V. (%) – A		7,38	22,31	6,81	11,16
C.V. (%) – B		8,52	41,23	19,88	22,36

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maior que 10 cm; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; TCA: taxa de crescimento absoluto; TCR: taxa de crescimento relativo; TAL: taxa de assimilação líquida; C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

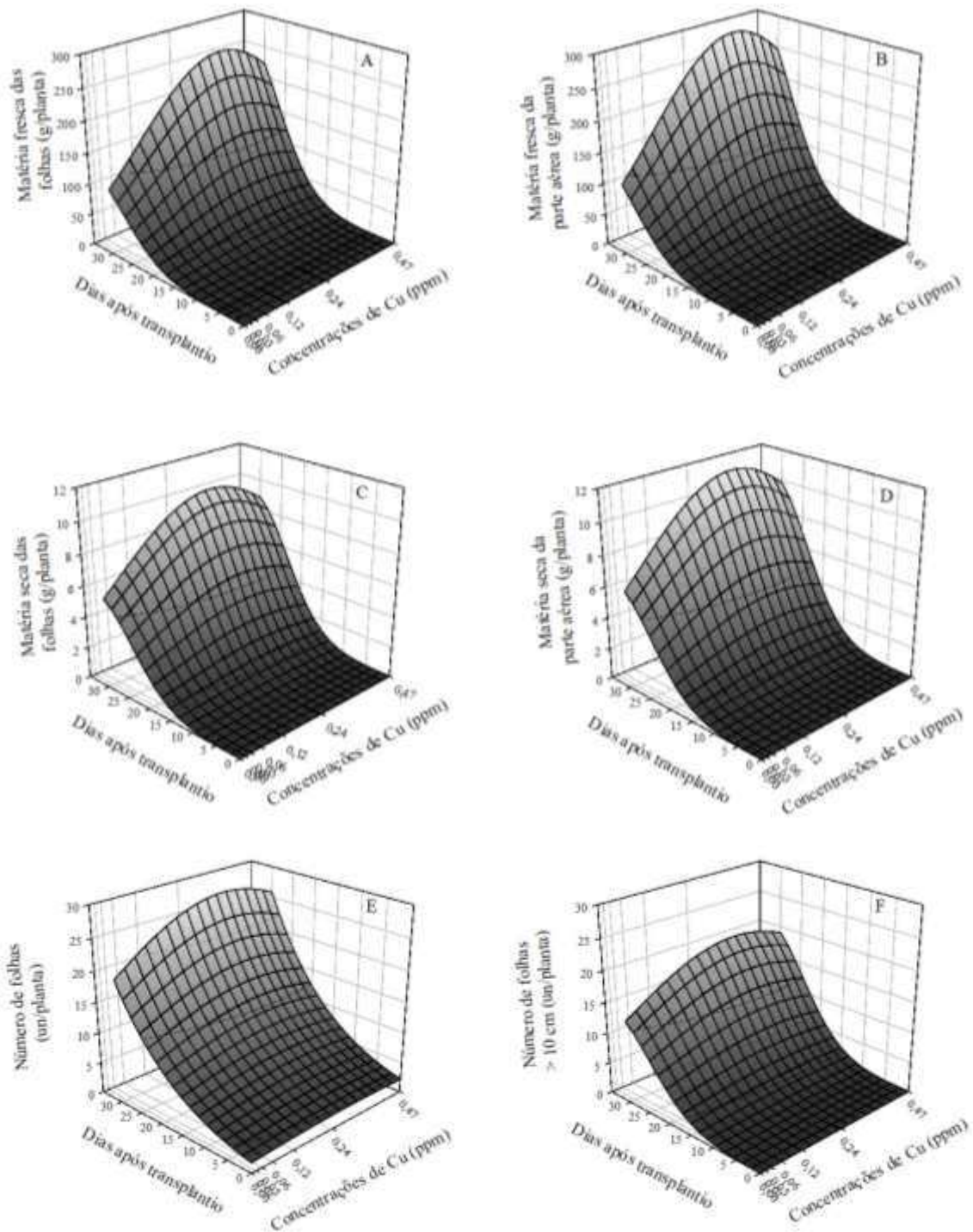


Figura 11 – Crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Cu e épocas após o transplantio. A - matéria fresca de folhas; B – matéria fresca de parte aérea; C – matéria seca de folhas; D – matéria seca de parte aérea; E – número total de folhas; F – número de folhas maiores que 10 cm; G – área foliar; H – taxa de crescimento absoluto; I – taxa de crescimento relativo e J – taxa de assimilação líquida. Os modelos de regressão são apresentados na Tabela 10. Continua.

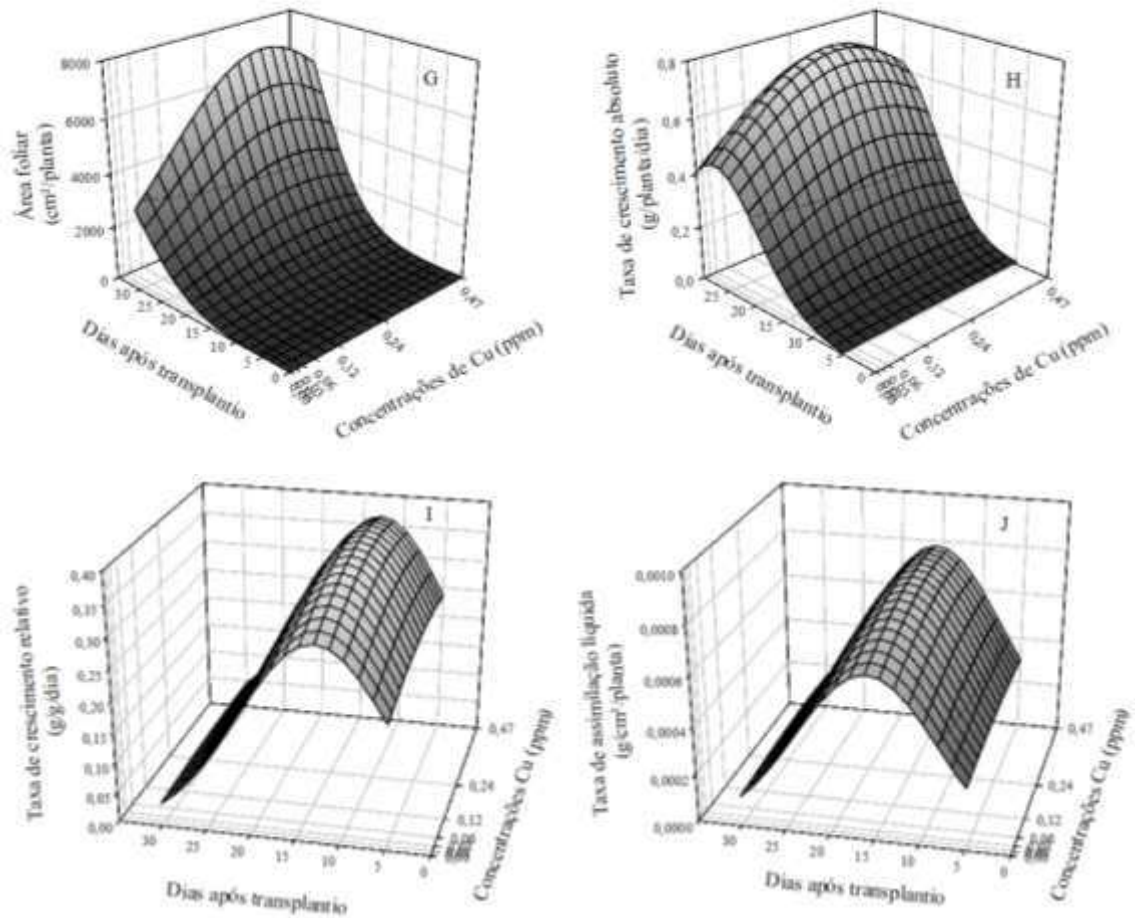


Figura 11 – Continuação.

As concentrações de Cu na solução necessárias para se atingir 100% de crescimento (C100) variaram de 0,31 ppm (para MSF, MSPA e NTF) até 0,33 ppm (para MFF, MFPA e AF). Para atingir 90% do máximo crescimento (C90), as concentrações de Cu variaram de 0,14 ppm (para NTF) a 0,22 (para MFF, MFPA e AF) (Tabela 13). Verificou-se, portanto, que a C100 e a C90 médias ocorreram, respectivamente, nas concentrações de Cu de 0,32 e 0,19 ppm.

Tabela 12 – Equações de regressão ajustadas para as variáveis de crescimento da alface em função das concentrações de Cu (x, em ppm) e das épocas de coleta (y, em dias após o transplântio)

Variáveis	Equações de regressão	R ²
MFf	$\hat{Y} = 319,03^{**} \exp(-0,5(((x-0,33^{**})/0,24^{**})^2 + ((y-35,27^{**})/8,63^{**})^2))$	95,47
MFPA	$\hat{Y} = 370,84^{**} \exp(-0,5(((x-0,33^{**})/0,24^{**})^2 + ((y-35,95^{**})/8,75^{**})^2))$	95,08
MSF	$\hat{Y} = 10,68^{**} \exp(-0,5(((x-0,31^{**})/0,28^{**})^2 + ((y-31,90^{**})/8,40^{**})^2))$	96,12
MSPA	$\hat{Y} = 12,21^{**} \exp(-0,5(((x-0,31^{**})/0,28^{**})^2 + ((y-32,61^{**})/8,60^{**})^2))$	95,95
NTF	$\hat{Y} = 1237,87^{ns} \exp(-0,5(((x-0,31^{**})/0,38^{**})^2 + ((y-134,68^{ns})/38,05^{*})^2))$	97,06
NF>10 cm	$\hat{Y} = 22,68^{**} \exp(-0,5(((x-0,32^{**})/0,34^{**})^2 + ((y-33,68^{**})/9,34^{**})^2))$	96,47
AF	$\hat{Y} = 11019,30^{*} \exp(-0,5(((x-0,33^{**})/0,25^{**})^2 + ((y-38,68^{**})/9,68^{**})^2))$	95,31
TCA	$\hat{Y} = 0,76^{**} \exp(-0,5(((x-0,30^{**})/0,30^{**})^2 + ((y-26,30)/7,27)^2))$	86,32
TCR	$\hat{Y} = 0,38^{**} \exp(-0,5(((x-0,33^{**})/0,56^{ns})^2 + ((y-12,83^{**})/8,38^{**})^2))$	72,48
TAL	$\hat{Y} = 0,0008^{**} \exp(-0,5(((x-0,35^{*})/0,59^{ns})^2 + ((y-15,74^{**})/7,81^{**})^2))$	78,57

MFf: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm; AF: área foliar; TCA: taxa de crescimento acumulado; TCR: taxa de crescimento relativo e TAL: taxa de assimilação líquida. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 13 – Concentrações de Cu na solução nutritiva necessárias para se atingir 100% (C100) e 90% (C90) do máximo crescimento absoluto de cada variável (MCV) da planta de alface

Variáveis	C100 (ppm)	C90 (ppm)	MCV
Matéria fresca de folhas (g/planta)	0,33	0,22	264,76
Matéria fresca de parte aérea (g/planta)	0,33	0,22	294,29
Matéria seca de folhas (g/planta)	0,31	0,18	10,41
Matéria seca de parte aérea (g/planta)	0,31	0,18	11,66
Número total de folhas	0,31	0,14	28,00
Número de folhas maiores que 10 cm	0,32	0,16	21,00
Área foliar (cm ²)	0,33	0,22	7.371,48
Médias	0,32	0,19	-

5.2.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos

Houve efeito significativo (p<0,01) das concentrações de Cu isoladamente sobre A e A/E (Tabela 14), que reduziram com o aumento da concentração de Cu (Figura 12). Para os

demais parâmetros de trocas gasosas (g_s , E e C_i/C_a) e para os teores foliares de pigmentos fotossintéticos, exceto para clorofila a, não houve efeito de tratamento. Contudo, não foi possível ajustar modelo de regressão para o teor de clorofila a. Os valores médios de g_s , E e C_i/C_a foram respectivamente de 250,12 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 6,08 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 0,77; e os teores de clorofila a, b e totais, e de carotenoides foram respectivamente de 0,08, 0,05, 0,14 e 0,02 g m^{-2} .

Tabela 14 – Resumo da análise de variância referente à taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência instantânea no uso de água (A/E), relação entre as concentrações interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) e dos teores foliares de pigmentos em plantas de alface em função das concentrações de Cu na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios				
		Trocias gasosas				
		A	g_s	E	A/E	C_i/C_a
Bloco	4	29,77*	2420,20 ^{ns}	4,73**	0,19 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Tratamento	6	30,43**	6239,80 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,64**	0,02 ^{ns}
Resíduo	24	7,78	6031,60	0,54	0,19	0,01
C.V. (%)		25,91	31,05	12,04	24,32	15,26
		Teores foliares de pigmentos				
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas totais	Carotenoides	
Tratamento	6	$3,93 \times 10^{-3}$ **	$1,78 \times 10^{-3}$ ^{ns}	$1,10 \times 10^{-2}$ ^{ns}	$2,86 \times 10^{-4}$ ^{ns}	
Resíduo	28	$8,21 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-4}$	$2,96 \times 10^{-3}$	$4,39 \times 10^{-5}$	
C.V. (%)		34,96	51,98	340,17	32,15	

C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

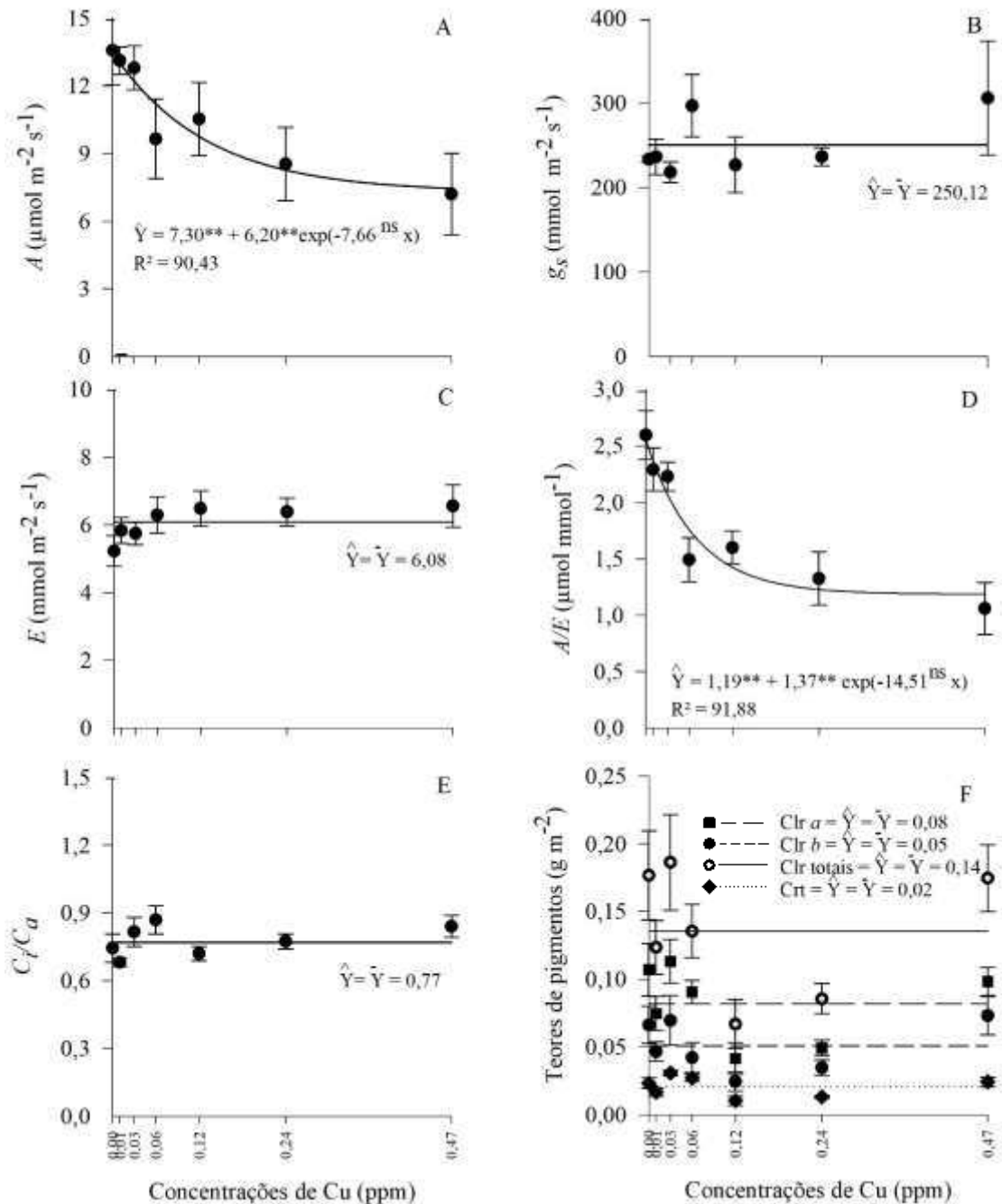


Figura 12 – Efeito das concentrações de Cu sobre as trocas gasosas e teores foliares de pigmentos de plantas de alface, avaliadas aos 28 dias pós o transplante. A - taxa de assimilação líquida de CO₂ (A); B - condutância estomática (g_s); C - transpiração (E); D - eficiência instantânea do uso da água (A/E); E - relação C_i/C_a e F - teores foliares de pigmentos (Clr a: clorofila a; Clr b: clorofila b; Clr totais: clorofilas totais; Crt: carotenoides). ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

5.2.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Houve efeito das concentrações de Cu sobre os teores foliares de P, Mg, S, Zn, Mn e Cu (Tabela 15), sendo possível ajustar modelos apenas para P e Cu. Enquanto o teor de P nas alfaces aumentou e estabilizou-se com o aumento da concentração de Cu na solução nutritiva, o teor de Cu respondeu de forma crescente (Figuras 13 e 14). Assim, os teores médios de N, K, Ca, Mg e S foram respectivamente de 37,23, 63,56, 12,62, 3,72 e 1,37 g kg⁻¹ (Figura 13) e os de Zn, Fe, B e Mn foram de 20,86, 89,73, 77,13 e 96,39 mg kg⁻¹ (Figura 14). Para o Cu, este atingiu o maior valor (12,07 mg kg⁻¹) na maior concentração testada (0,47 ppm de Cu).

Tabela 15 – Resumo da análise de variância dos teores médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento da colheita, em função de diferentes concentrações de Cu na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios					
		Teores de macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Trat.	6	11,15 ^{ns}	2,29 ^{**}	160,53 ^{ns}	2,55 ^{ns}	1,06 ^{**}	0,15 ^{**}
Resíduo	21	5,81	0,13	86,13	0,66	0,06	0,03
C.V. (%)		6,48	4,65	14,60	6,42	6,70	12,49
		Teores de micronutrientes					
		Zn	Fe	Mn	B	Cu	
Trat.	6	1265,66 ^{**}	240,82 ^{ns}	940,75 ^{**}	42,56 ^{ns}	72,79 ^{**}	
Resíduo	21	3,27	149,03	70,13	56,98	0,58	
C.V. (%)		8,67	13,61	8,69	9,79	13,08	

C.V.: coeficiente de variação. ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

Os conteúdos de macro e micronutrientes na planta de alface foram afetados em função da concentração de Cu empregada na solução nutritiva (Tabela 16), isso porque a produção de MSPA (Figura 11) também sofreu efeitos do Cu na solução. Todavia não foi possível ajustar modelos para o Mg, S e Zn (Figuras 13 e 14). As concentrações de Cu influenciaram positivamente e de forma quadrática o acúmulo de N, P e Ca, exponencial o de K (Figura 13), linear o de Cu e exponencial o de Fe, B e Mn (Figura 14).

Tabela 1 - Resumo da análise de variância dos conteúdos médios de macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento de colheita, em função de diferentes concentrações de Cu na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		Conteúdo de macronutrientes		
		N	P	K
Tratamento	6	$2,20 \times 10^{-2**}$	$1,65 \times 10^{-3**}$	$0,09^{**}$
Resíduo	21	$1,11 \times 10^{-3}$	$5,57 \times 10^{-5}$	0,01
C.V. (%)		10,73	11,10	17,19
		Conteúdo de macronutrientes		
		Ca	Mg	S
Tratamento	6	$2,51 \times 10^{-3**}$	$2,67 \times 10^{-4**}$	$3,49 \times 10^{-5**}$
Resíduo	21	$1,38 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-5}$	$2,18 \times 10^{-6}$
C.V. (%)		11,16	12,46	13,07
		Conteúdo de micronutrientes		
		Zn	Fe	Mn
Tratamento	6	$0,14^{**}$	$0,11^{**}$	$0,33^{**}$
Resíduo	21	$1,81 \times 10^{-4}$	0,01	0,01
C.V. (%)		7,27	14,63	11,38
		Conteúdo de micronutrientes		
		B	Cu	
Tratamento	6	$0,11^{**}$	$7,74 \times 10^{-3**}$	
Resíduo	21	0,01	$5,68 \times 10^{-5}$	
C.V. (%)		10,97	13,89	

C.V.: coeficiente de variação. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

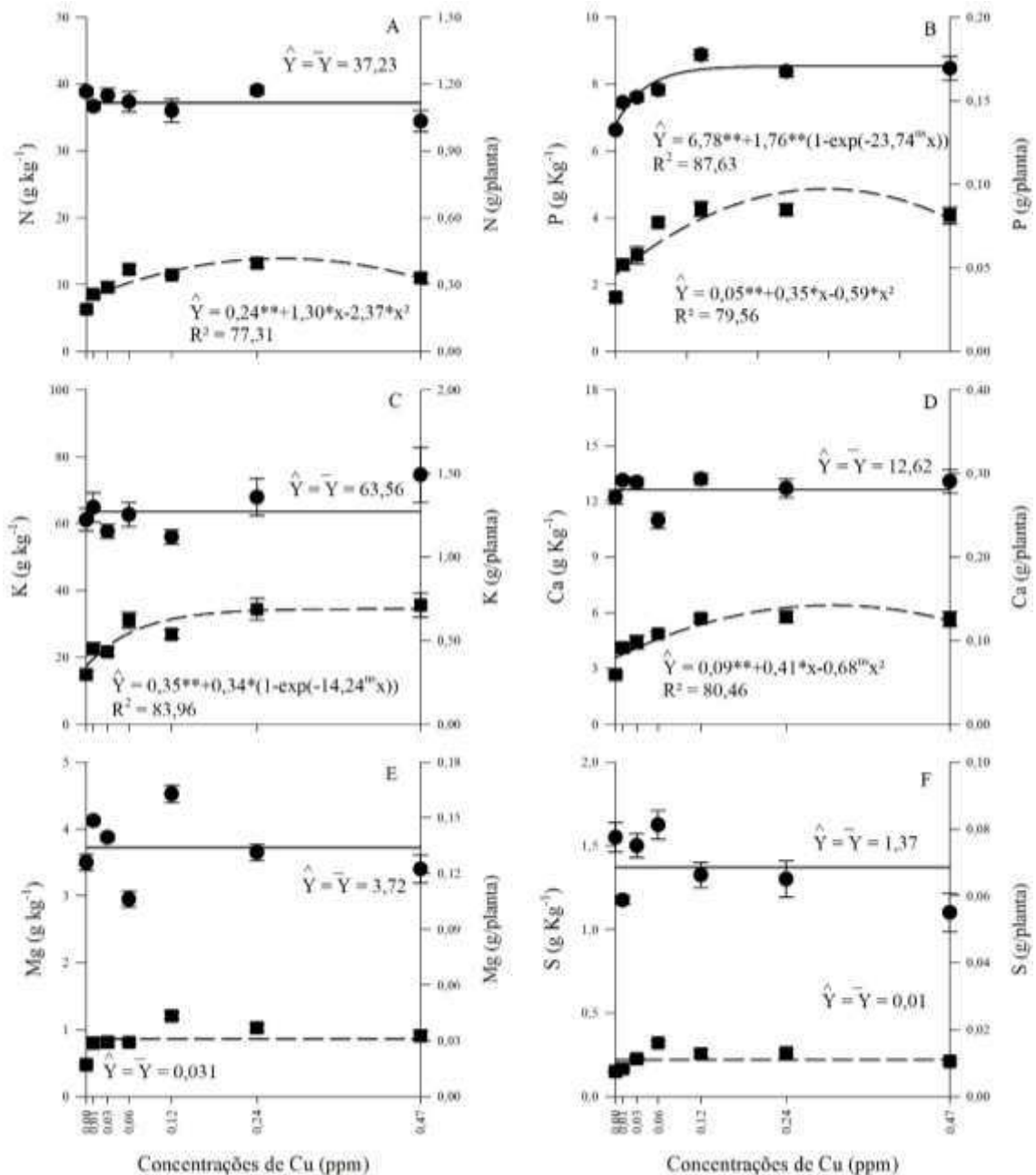


Figura 13 – Teores e conteúdos de macronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Cu. A – nitrogênio; B – fósforo; C – potássio; D – cálcio; E – magnésio e F – enxofre. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

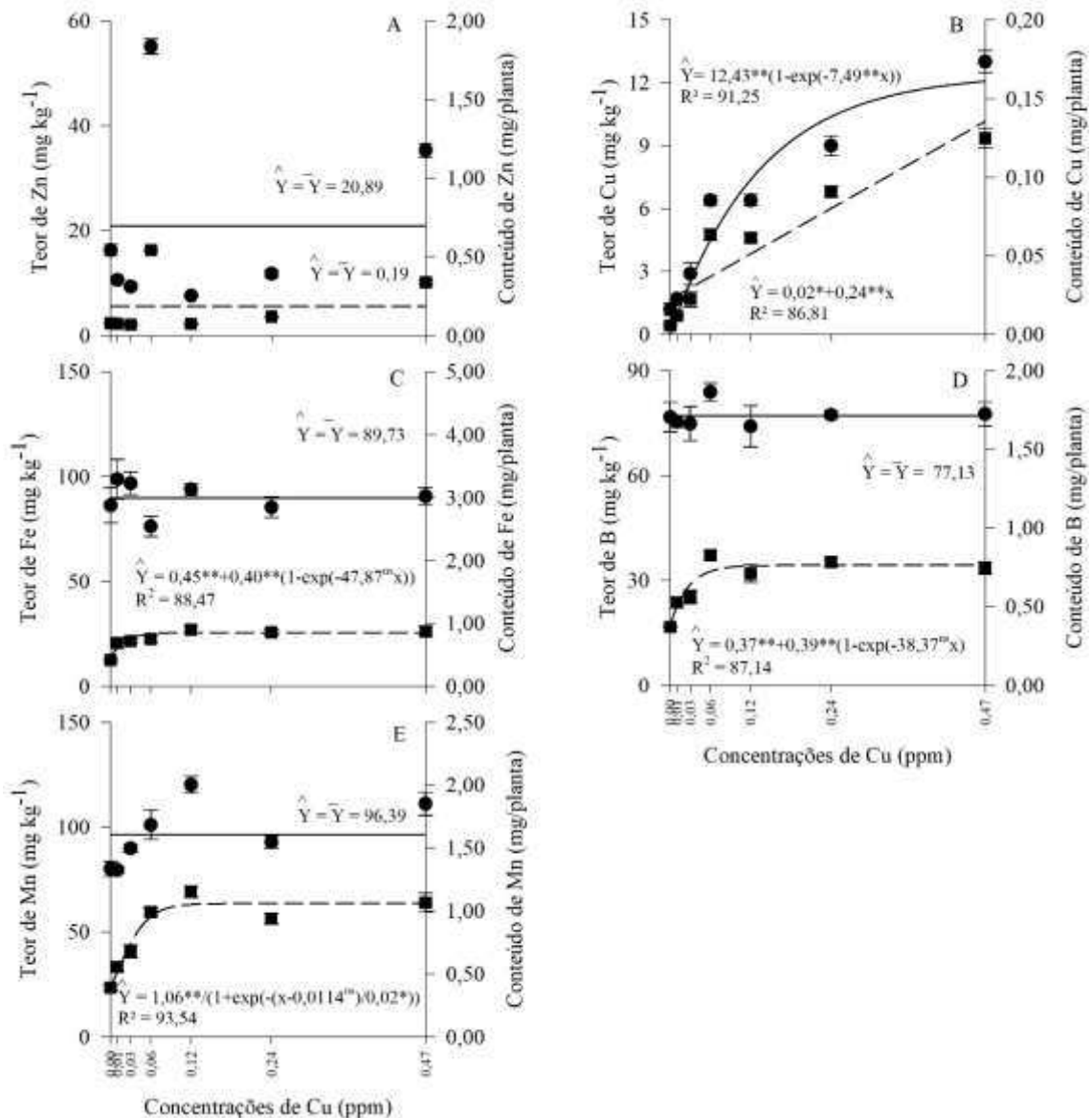


Figura 14 - Teores e conteúdos de micronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Cu. A – zinco; B – cobre; C – ferro; D – boro e E – manganês. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

5.3 Experimento com Mn

5.3.1 Crescimento

Embora a interação entre concentração de Mn e épocas de coleta tenha sido significativa para todas as variáveis (Tabela 17), não foi possível encontrar um modelo com lógica biológica para expressá-la, assim como também não foi possível encontrar modelos significativos relacionando as variáveis de crescimento às concentrações de Mn na solução nutritiva (Figura 15). Todavia, independentemente de concentrações, o crescimento da planta de alface respondeu às épocas de coleta (Figura 16).

Tabela 17 – Resumo da análise de variância das variáveis de crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Mn e épocas de coleta após o transplântio

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		MFF	MFPA	MSF	MSPA
Concentração (A)	6	2237,00**	2230,00**	6,41**	7,16**
Erro a	21	61,00	77,00	0,50	0,66
Época (B)	7	1,33x10 ^{5**}	1,52x10 ^{5*}	365,95**	424,22**
AB	42	628,00**	507,00*	1,60**	1,70**
Erro b	98	55,00	65,00	0,13	0,16
C.V. (%) – A		12,32	12,97	19,71	21,42
C.V. (%) – B		11,70	11,87	9,88	10,49
		NTF	NF> 10 cm	AF	AFE
Concentração (A)	6	16,45**	9,48**	1,49x10 ^{6**}	1,13x10 ^{4**}
Erro a	21	2,14	1,92	5,44x10 ⁴	1797,00
Época (B)	7	1420,45**	1169,53**	1,05x10 ^{8**}	2,38x10 ^{5**}
AB	42	3,55**	2,87**	4,42x10 ^{5**}	2445,00*
Erro b	98	1,02	0,65	4,28x10 ⁴	1505,00
C.V. (%) – A		12,82	19,27	12,72	7,65
C.V. (%) – B		8,87	11,22	11,28	6,99
		RAF	TCA	TCR	TAL
Concentração (A)	6	1,04x10 ^{4**}	97,88**	0,018**	109,69**
Erro a	21	1,59x10 ³	1,01	3,12x10 ⁻⁴	2,39
Época (B)	7	2,85x10 ^{5**}	865,58**	0,19**	150,85**
AB	42	2,17x10 ^{3*}	26,20**	0,01**	26,56**
Erro b	98	1,39x10 ³	5,85	1,67x10 ⁻³	7,11
C.V. (%) – A		7,49	14,76	8,94	33,54
C.V. (%) – B		7,00	35,44	20,7	57,78

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; TCA: taxa de crescimento absoluto; TCR: taxa de crescimento relativo; TAL: taxa assimilatória líquida; C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

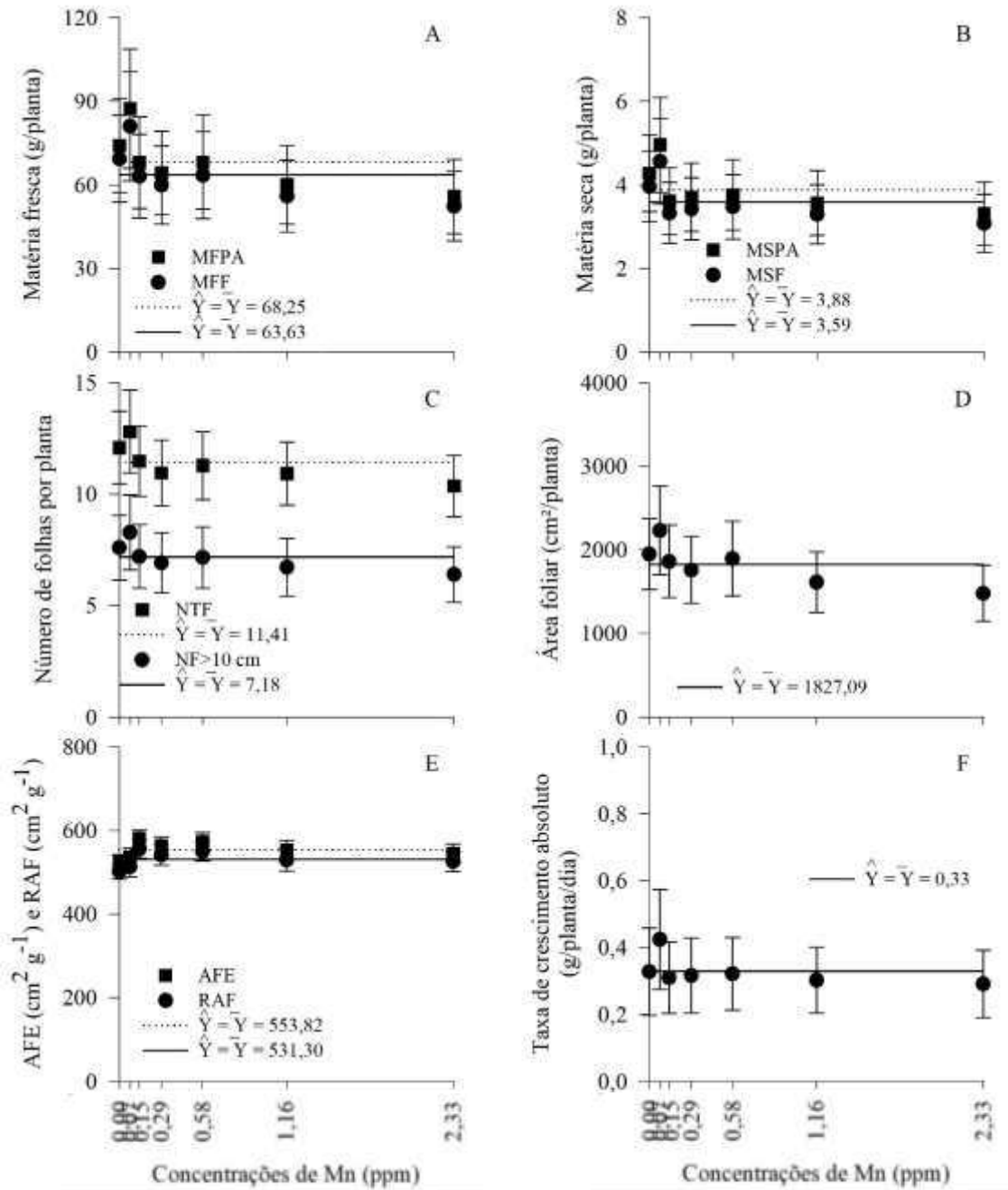


Figura 15 - Comportamento das variáveis em função das concentrações de Mn, independentemente das épocas de avaliação. A – matéria fresca de folhas (MFF) e da parte aérea (MFFA); B – matéria seca de folhas (MSF) e da parte aérea (MSPA); C - número total de folhas (NTF) e número de folhas maiores que 10 cm (NF>10 cm); D- área foliar, E – área foliar específica (AFE) e razão de área foliar (RAF); F – taxa de crescimento absoluto; G- taxa de crescimento relativo e H – taxa de assimilação líquida. Continua.

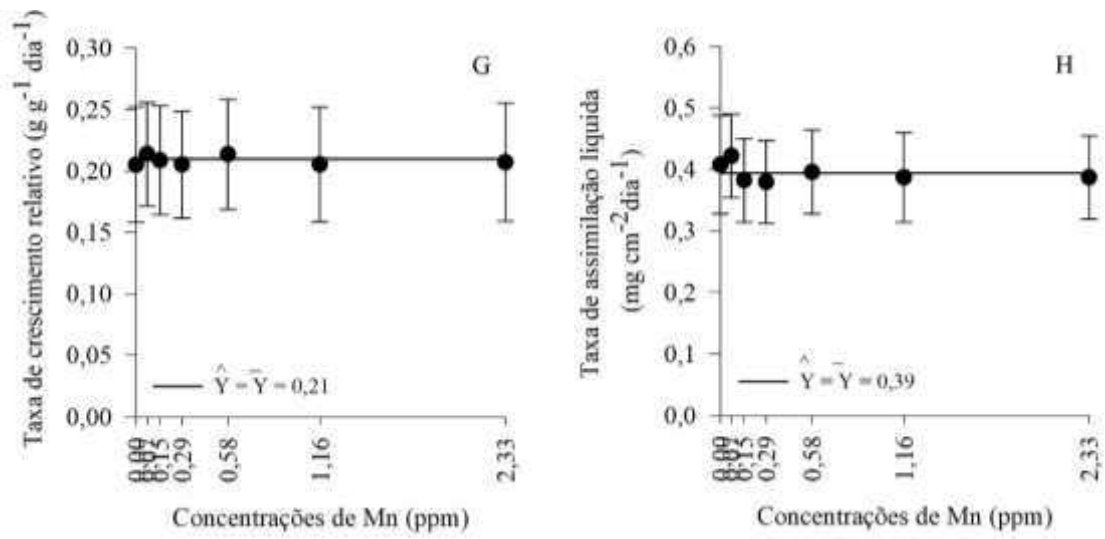


Figura 16 – Continuação.

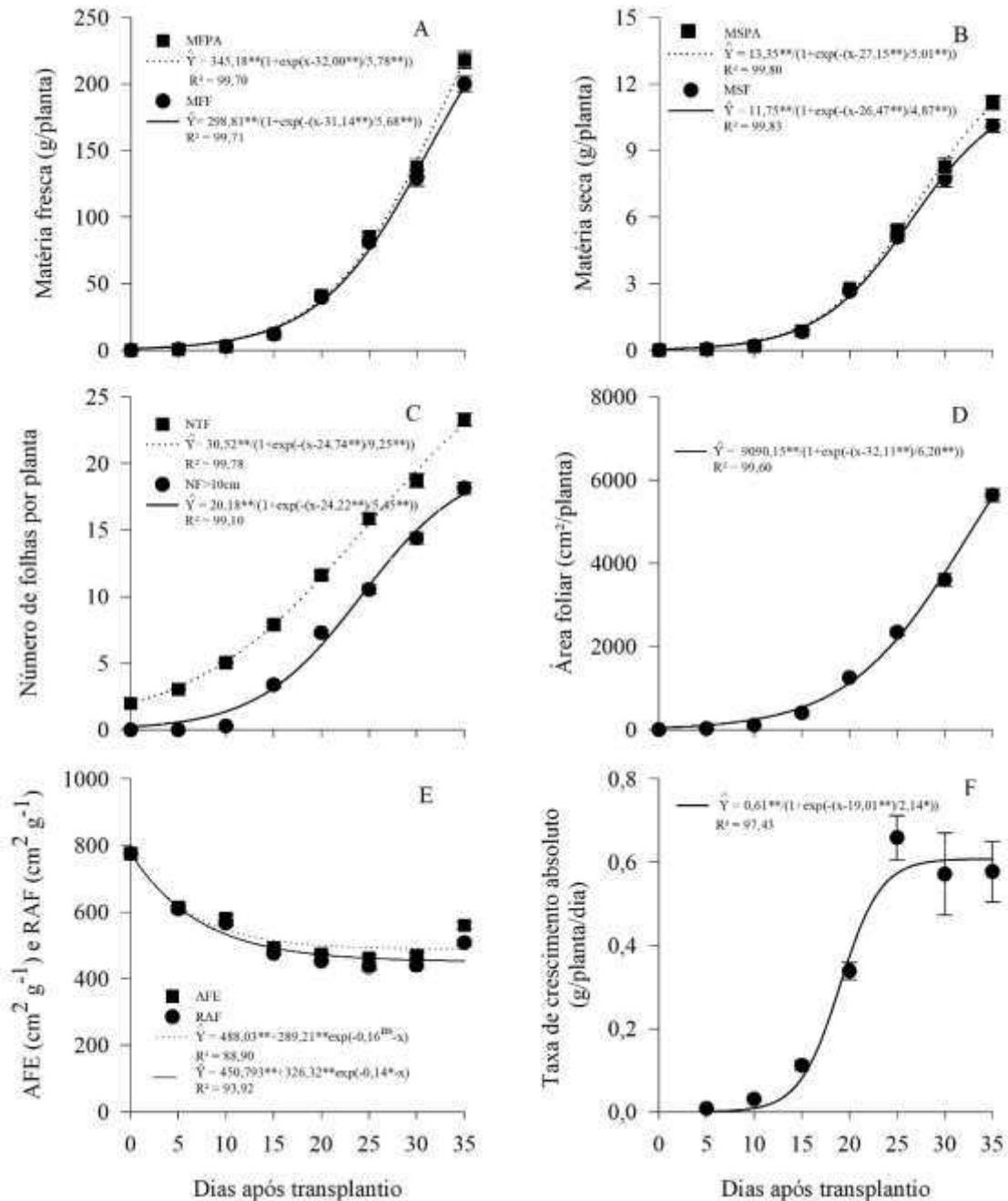


Figura 17 - Crescimento de plantas de alface em função das épocas de coleta após o transplantio, independentemente da concentração de Mn na solução. A – matéria fresca de folhas (MFF) e da parte aérea (MFPA); B – matéria seca de folhas (MSF) e da parte aérea (MSPA); C – número total de folhas (NTF) e número de folhas maiores que 10 cm (NF>10 cm); D- área foliar; E – área foliar específica (AFE) e razão de área foliar (RAF); F – taxa de crescimento absoluto; G- taxa de crescimento relativo e H – taxa de assimilação líquida. Continua.

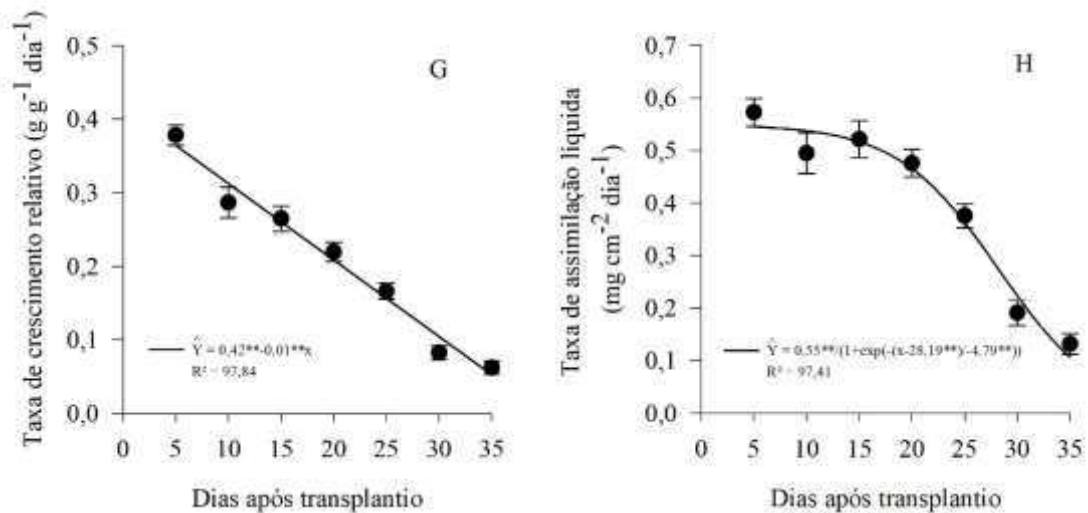


Figura 16 – Continuação.

5.3.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos

Não houve efeito significativo das concentrações de Mn na solução nutritiva sobre as trocas gasosas (Tabela 18 e Figura 17), mas houve sobre os teores de clorofila a e de carotenoides (Tabela 18). Entretanto não foi encontrado modelo que explicasse o efeito (Figura 17). Assim, os valores médios de A, g_s, E, A/E e C_i/C_a foram respectivamente de 11,24 μmol m⁻² s⁻¹, 73,16 mmol m⁻² s⁻¹, 2,86 mmol m⁻² s⁻¹, 4,40 μmol mmol⁻¹ e 0,29; e os teores de clorofila a, b e totais, e de carotenoides foram respectivamente de 0,12, 0,07, 0,19 e 0,04 g m⁻².

Tabela 18 – Resumo da análise de variância referente à taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência instantânea no uso de água (A/E), relação entre as concentrações interna e externa de CO₂ (C_i/C_a) e teores foliares de pigmentos em plantas de alface em função das concentrações de Mn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios				
		Trocias gasosas				
		A	g _s	E	A/E	C _i /C _a
Bloco	4	7,75*	7,02x10 ^{-4ns}	0,79 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Tratamento	6	5,99 ^{ns}	4,81x10 ^{-4ns}	0,46 ^{ns}	0,44 ^{ns}	9,79x10 ^{-3ns}
Resíduo	24	2,55	3,79x10 ⁻⁴	0,37	0,35	9,80x10 ⁻³
C.V. (%)		14,22	26,63	23,11	13,44	34,20
Teores foliares de pigmentos						
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas totais	Carotenoides	
Tratamento	6	6,77x10 ^{-4**}	2,48x10 ^{-4ns}	1,75x10 ^{-3ns}	1,60x10 ^{-4**}	
Resíduo	28	1,22x10 ⁻⁴	2,99x10 ⁻⁴	7,26x10 ⁻⁴	2,46x10 ⁻⁵	
C.V. (%)		9,17	25,04	13,91	13,81	

C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F;
^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

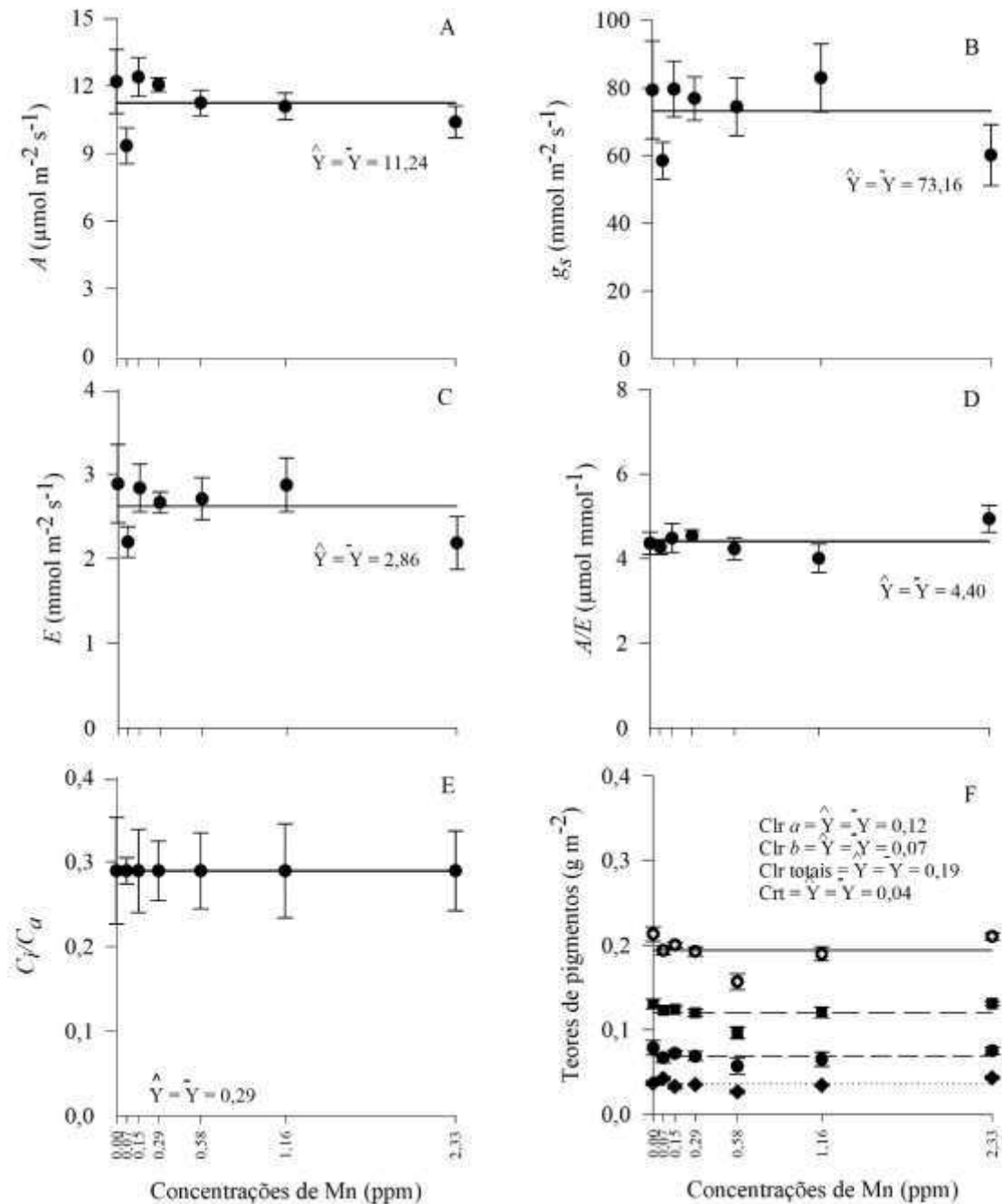


Figura 18 – Efeito das concentrações de Mn sobre as trocas gasosas e teores foliares de pigmentos de plantas de alface, avaliadas aos 27 dias pós o transplantio. A - assimilação líquida de CO₂ (A); B - condutância estomática (g_s); C - transpiração (E); D - eficiência instantânea do uso da água (A/E); E - relação C_i/C_a e F- teores foliares de pigmentos (Clr a: clorofila a; Clr b: clorofila b; Clr totais: clorofilas totais; Crt: carotenoides).

5.3.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Embora a concentração de Mn tenha afetado os teores foliares de Mg, Mn, Zn, Fe e Cu (Tabela 19), apenas para o teor de Mn foi possível ajustar modelo, que aumentou com o aumento de sua concentração na solução nutritiva (Figuras 18 e 19). O maior teor foliar de

Mn ($230,01 \text{ mg kg}^{-1}$) foi atingido na maior concentração testada ($2,33 \text{ ppm}$ de Mn). Os teores médios de N, P, K, Ca, Mg e S foram respectivamente de 35,67, 7,15, 80,84, 7,25, 3,55 e $1,94 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 18) e os de Zn, Cu Fe e B foram de 19,90, 4,44, 74,37 e $65,99 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 19).

Tabela 19 - Resumo da análise de variância dos teores médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento da colheita, em função de diferentes concentrações de Mn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios					
		Teor de macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Trat.	6	7,80 ^{ns}	0,52 ^{ns}	66,08 ^{ns}	1,55 ^{ns}	1,45 ^{**}	0,10 ^{ns}
Resíduo	21	3,09	0,25	41,62	0,61	0,13	0,11
C.V. (%)		4,93	6,99	7,98	10,76	9,91	16,82
		Teor de micronutrientes					
		Zn	Fe	Mn	B	Cu	
Trat.	6	1642,54 ^{**}	188,10 ^{**}	$2,59 \times 10^{4**}$	67,97 ^{ns}	0,62 ^{**}	
Resíduo	21	11,84	40,23	267,00	27,40	0,10	
C.V. (%)		16,41	8,53	17,51	7,93	7,15	

C.V.: coeficiente de variação. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

Houve efeito significativo ($p < 0,01$) das concentrações de Mn na solução nutritiva sobre os conteúdos de nutrientes nas plantas de alface (Tabela 20). O conteúdo de Mn aumentou com o aumento da concentração do nutriente na solução nutritiva (Figuras 18 e 19), atingindo o máximo de 2,50 mg/planta na maior concentração testada. Todavia, não foi possível ajustar modelos para os demais nutrientes (Figuras 18 e 19).

Tabela 20 - Resumo da análise de variância dos conteúdos médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento de colheita, em função de diferentes concentrações de Mn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		Conteúdo de macronutrientes		
		N	P	K
Tratamento	6	0,02**	$8,63 \times 10^{-4**}$	0,05**
Resíduo	21	$9,33 \times 10^{-4}$	$5,51 \times 10^{-5}$	0,01
C.V.%		7,67	9,28	11,51
		Conteúdo de macronutrientes		
		Ca	Mg	S
Tratamento	6	$1,04 \times 10^{-3**}$	$4,52 \times 10^{-4**}$	$4,30 \times 10^{-5**}$
Resíduo	21	$1,02 \times 10^{-4}$	$1,78 \times 10^{-5}$	$1,10 \times 10^{-5}$
C.V.%		12,47	10,61	15,45
		Conteúdo de micronutrientes		
		Zn	Fe	Mn
Tratamento	6	0,18**	0,09**	2,51**
Resíduo	21	$1,30 \times 10^{-3}$	0,01	0,02
C.V.%		15,81	10,96	14,39
		Conteúdo de micronutrientes		
		B	Cu	
Tratamento	6	0,09**	$3,37 \times 10^{-4**}$	
Resíduo	21	0,01	$3,17 \times 10^{-5}$	
C.V.%		11,71	11,24	

C.V.: coeficiente de variação. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

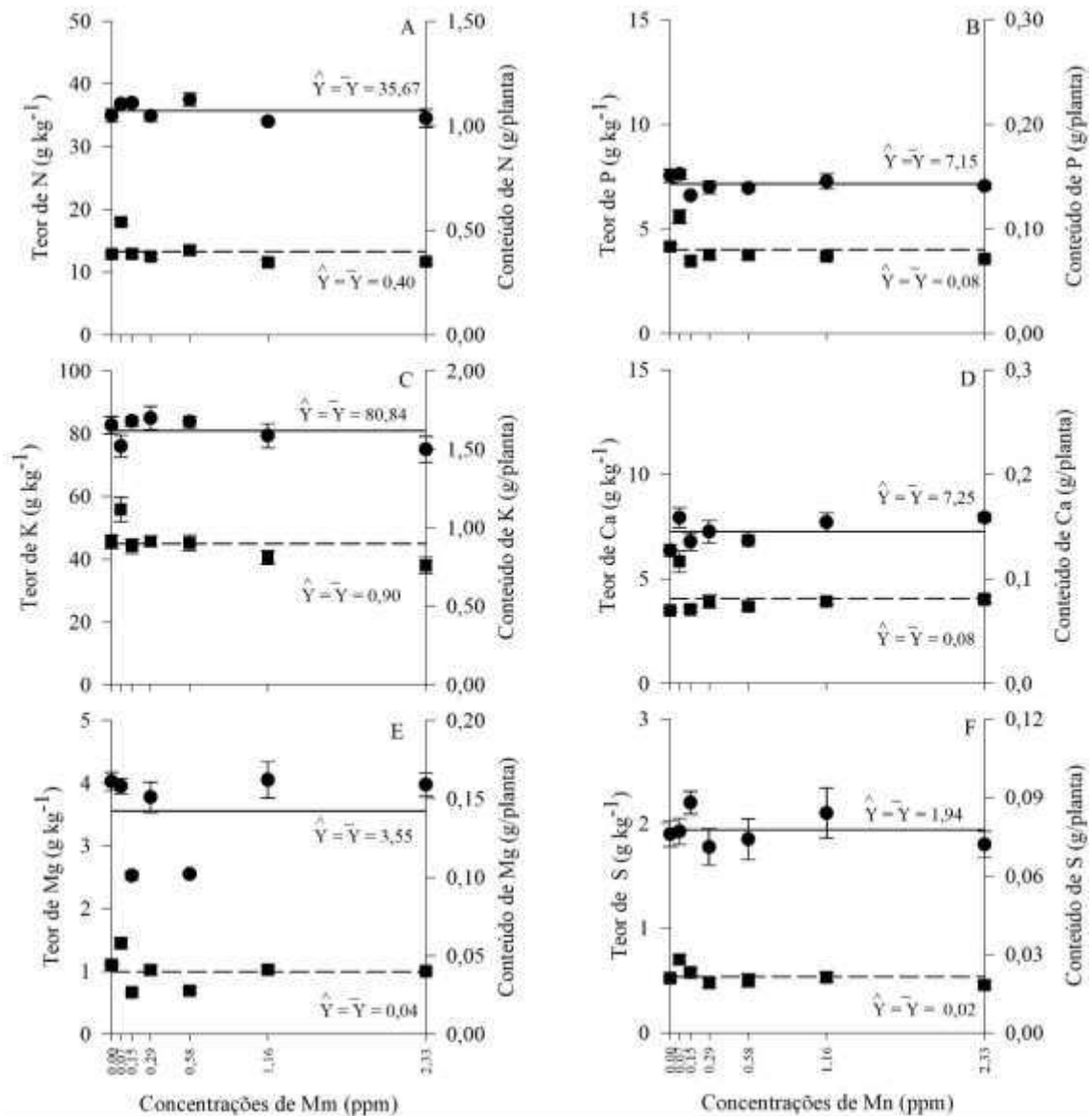


Figura 19 - Teores de macronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Mn. A – nitrogênio; B – fósforo; C – potássio; D – cálcio; E – magnésio e F – enxofre. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes.

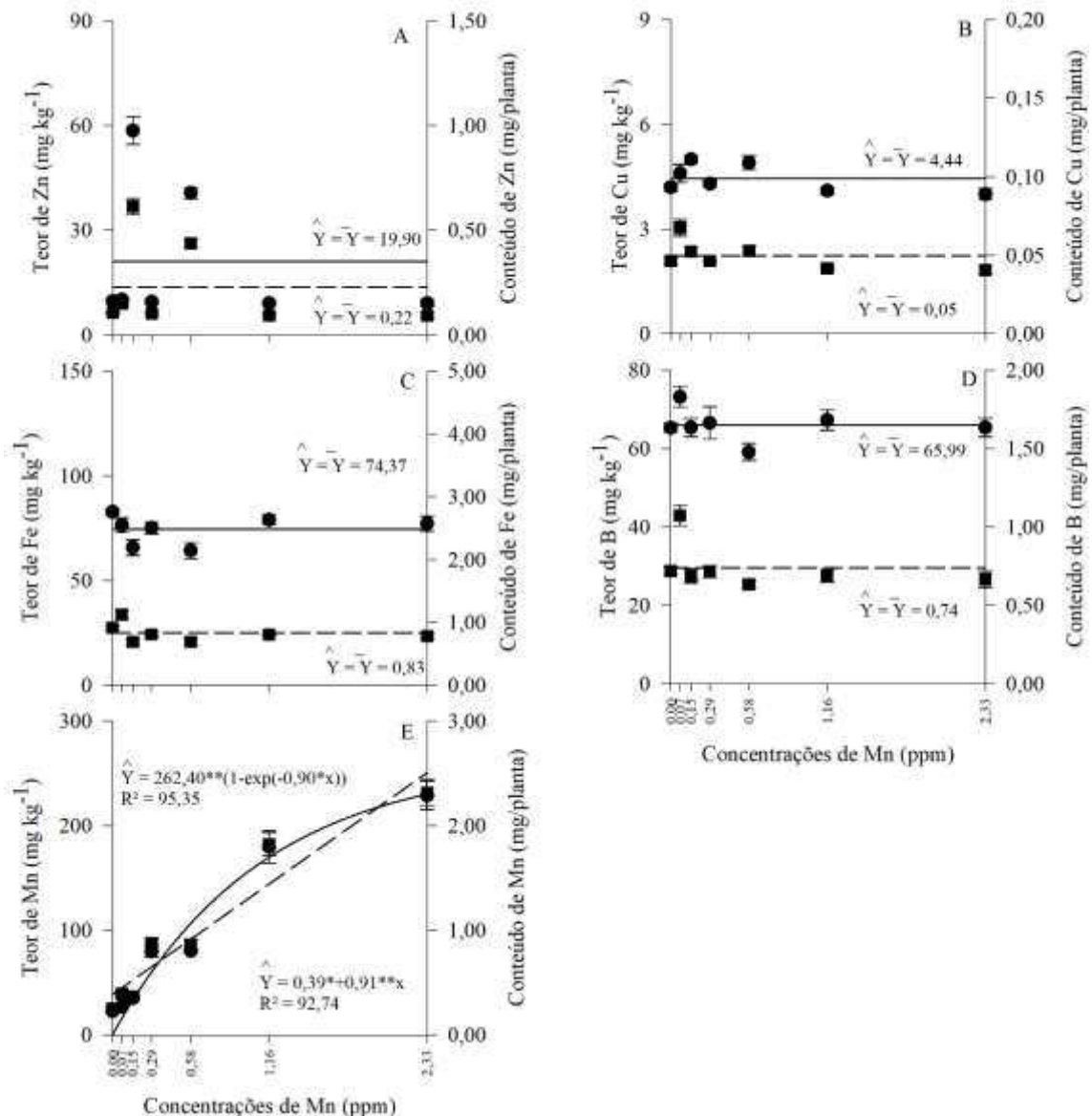


Figura 20 - Teores e conteúdos de micronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Mn. A – zinco; B – cobre; C – ferro; D – boro e E – manganês. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

5.4 Experimento com Zn

5.4.1 Crescimento

A interação entre concentrações de Zn e épocas de coleta foi significativa para todas as variáveis de crescimento (Tabela 21). Particularmente para as variáveis MFF, MFPA, NF > 10 cm e AF foram ajustadas superfícies de resposta (Figura 20 e Tabela 22) que mostraram o incremento dessas variáveis em função prioritariamente das épocas e, discretamente, em função das concentrações. De fato, não foi possível ajustar nenhum modelo de regressão relacionando as variáveis de crescimento às concentrações

isoladamente. Assim, foi possível estabelecer a C100 para MFF, MFPA, NF>10 cm e AF, que variaram entre 0,22 (para AF) e 0,28 ppm (para MFF), e a C90 apenas para a MFF (0,0047 ppm) (Tabela 23).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância das variáveis de crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Zn e épocas de coleta após o transplântio

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		MFF	MFPA	MSF	MSPA
Concentração (A)	6	740,00**	900,00**	0,80**	1,00**
Erro a	21	66,00	72,00	0,21	0,25
Época (B)	7	1,88x10 ⁵ **	2,19x10 ⁵ **	387,18**	459,14**
AB	42	346,00**	422,00**	0,39**	0,49**
Erro b	98	53,00	58,00	0,14	0,17
C.V. (%) – A		11,95	11,71	9,88	12,92
C.V. (%) – B		10,68	10,48	7,01	10,56
		NTF	NF> 10 cm	AF	AFE
Concentração (A)	6	3,51*	2,84*	5,19x10 ⁵ **	5090,00*
Erro a	21	1,23	0,94	92204,00	1592,00
Época (B)	7	1719,91**	1313,92**	1,45x10 ⁸ **	7,96x10 ⁵ **
AB	42	2,59**	1,64**	2,47x10 ⁵ **	4344,00**
Erro b	98	0,62	0,28	45924,00	1216,00
C.V. (%) – A		9,88	13,85	15,80	6,90
C.V. (%) – B		7,01	7,51	11,15	6,03
		RAF	TCA	TCR	TAL
Concentração (A)	6	4472,00*	15,93**	3,63x10 ^{-4ns}	7,23**
Erro a	21	1500,00	1,90	3,64x10 ⁻⁴	0,23
Época (B)	7	8,50x10 ⁵ **	1,13x10 ³ **	0,24**	140,16**
AB	42	4108,00**	406,80**	0,002*	3,97**
Erro b	98	1130,00	8264,00	0,001	0,63
C.V. (%) – A		6,95	18,74	8,15	13,59
C.V. (%) – B		6,03	27,53	15,01	22,76

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; TCA: taxa de crescimento absoluto; TCR: taxa de crescimento relativo; TAL: taxa assimilatória líquida; C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

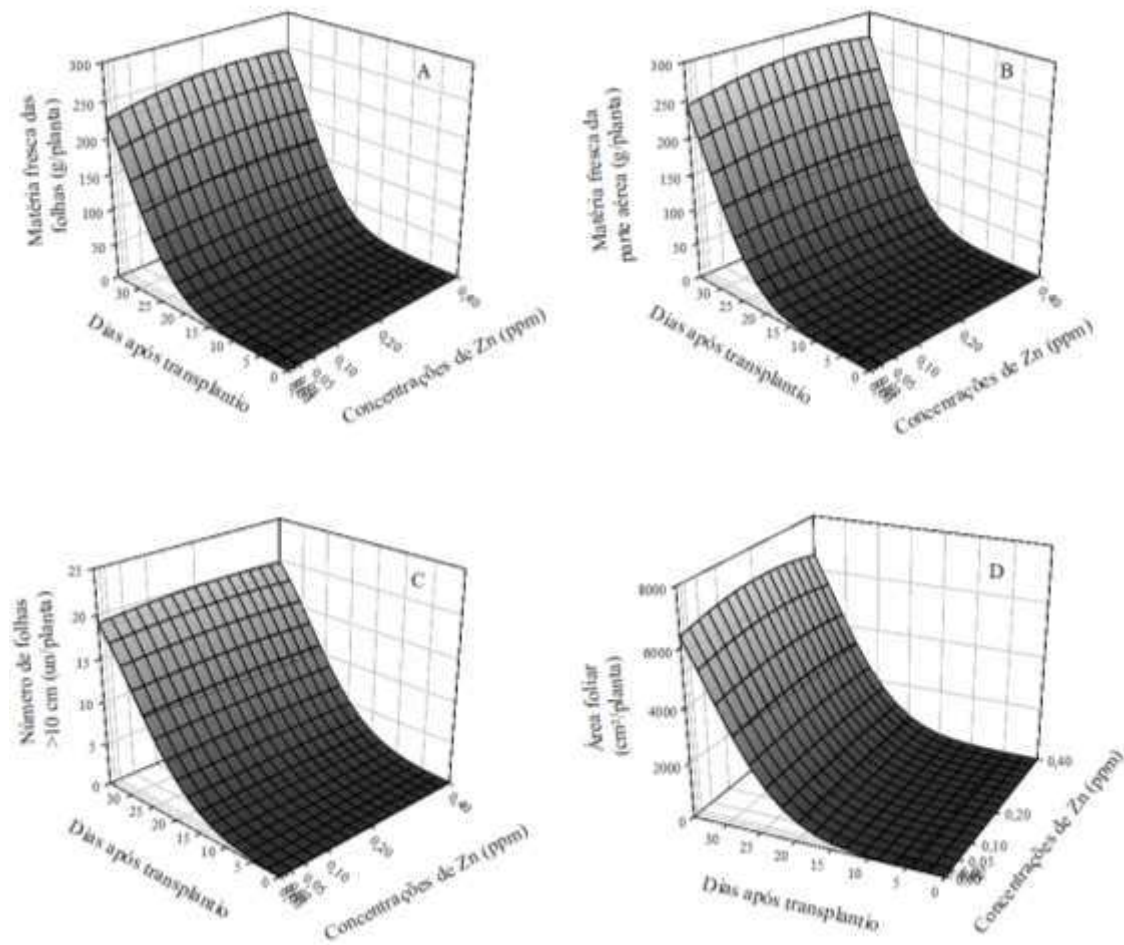


Figura 21 – Crescimento de plantas de alface em função das concentrações de Zn e da época de coleta após o transplântio. A - matéria fresca das folhas; B - matéria fresca da parte aérea; C - número de folhas maiores que 10 cm e D - área foliar. Os modelos de regressão são apresentados na Tabela 18.

Tabela 22 – Equações de regressão ajustadas para as variáveis de crescimento da alface em função das concentrações de Zn (x, em ppm) e da época de coleta (y, em dias após o transplântio), e o coeficiente de determinação

Variáveis	Equações de regressão	R ²
MFF	$\hat{Y} = 296,85^{**} \exp(-0,5(((x-0,28^{**})/0,60^{**})^2 + ((y-40,41^{**})/9,25^{**})^2))$	98,87
MFPA	$\hat{Y} = 329,68^{**} \exp(-0,5(((x-0,27^{**})/0,59^{**})^2 + ((y-40,86^{**})/9,32^{**})^2))$	98,81
NF>10 cm	$\hat{Y} = 22,01^{**} \exp(-0,5(((x-0,26^{**})/0,88^{ns})^2 + ((y-40,41^{**})/12,06^{**})^2))$	98,84
AF	$\hat{Y} = 8813,48^{**} \exp(-0,5(((x-0,22^{**})/0,57^{**})^2 + ((y-42,17^{**})/10,16^{**})^2))$	98,81

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm e AF: área foliar. ** Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 3 – Concentrações de Zn na solução nutritiva necessárias para se atingir 100% (C100) e 90% (C90) do máximo crescimento absoluto de cada variável (MCV) da planta de alface

Variáveis	C100 (ppm)	C90 (ppm)	MCV
Matéria fresca de folhas (g/planta)	0,28	0,0047	250,18
Matéria fresca de parte aérea (g/planta)	0,27	-	270,55
Número de folhas maiores que 10 cm	0,26	-	20,00
Área foliar (cm ² /planta)	0,22	-	6.870,73
Médias	0,26	0,0047	-

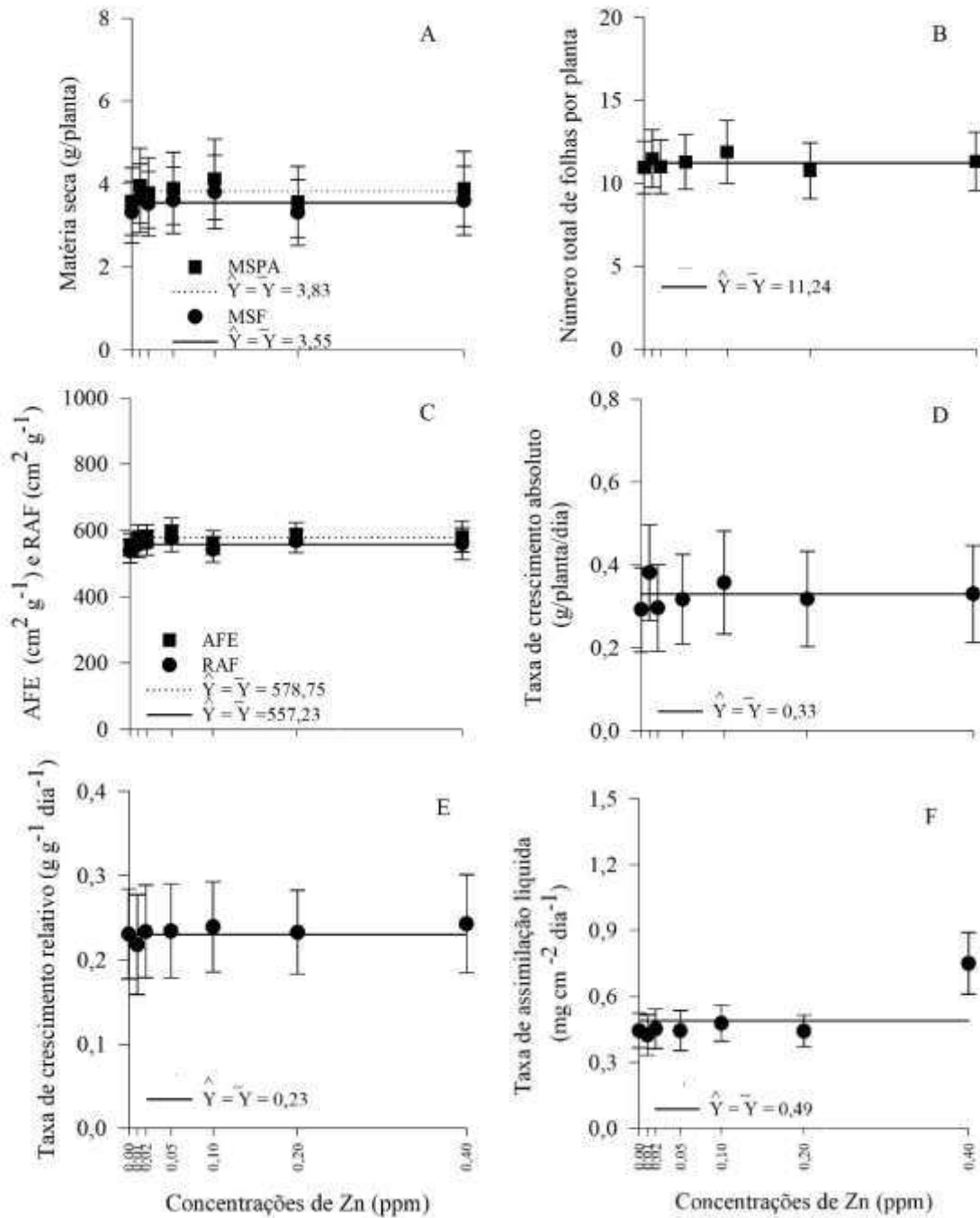


Figura 22 - Comportamento das variáveis de crescimento em função das concentrações Zn, independentemente das épocas de avaliação. A – matéria seca de folhas (MSF) e da parte aérea (MSPA); B – número total de folhas; C - área foliar específica (AFE) e razão de área foliar (RAF); D – taxa de crescimento absoluto; E- taxa de crescimento relativo e F – taxa de assimilação líquida.

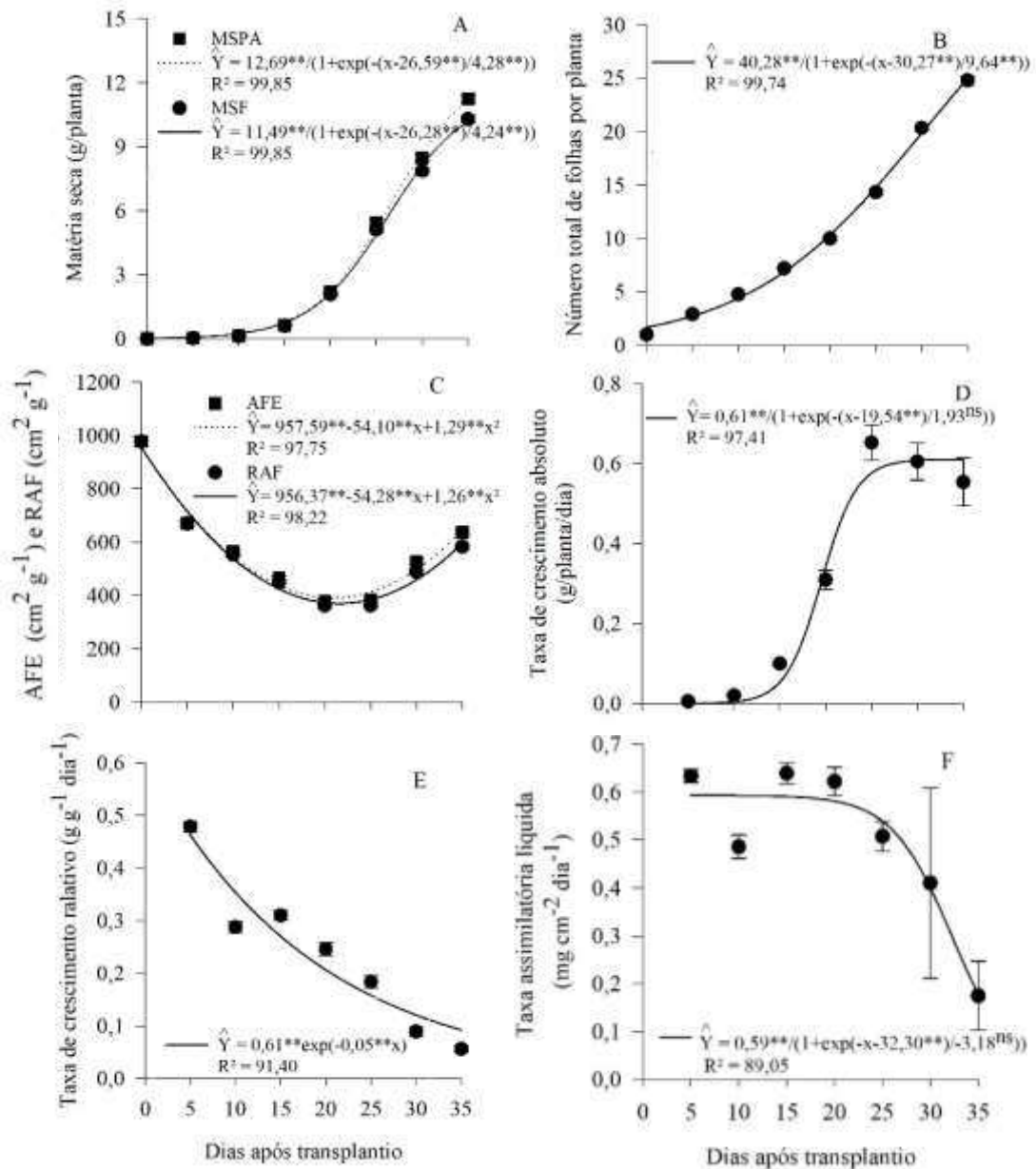


Figura 23 – Crescimento de plantas de alface em função da época após o transplantio, independentemente da concentração de Zn na solução. A – matéria seca de folhas (MFF) e da parte aérea (MSPA); B – número total de folhas; C – área foliar específica (AFE) e razão de área foliar (RAF); D – taxa de crescimento absoluto; E - taxa de crescimento relativo e F – taxa de assimilação líquida. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

5.4.2 Teores foliares de pigmentos

Os teores foliares de pigmentos não foram afetadas pelas concentrações de Zn (Tabela 24 e Figura 23). Os valores de clorofila a, b e totais, e de carotenoides foram respectivamente de 0,12, 0,05, 0,17 e 0,04 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância dos teores foliares de pigmentos fotossintéticos em plantas de alface em função das concentrações de Zn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios			
		Teores foliares de pigmentos			
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas totais	Carotenoides
Tratamento	6	$1,88 \times 10^{-3ns}$	$2,25 \times 10^{-3ns}$	$1,64 \times 10^{-3ns}$	$7,55 \times 10^{-3ns}$
Resíduo	28	$2,21 \times 10^{-3}$	$2,27 \times 10^{-3}$	$6,99 \times 10^{-4}$	$9,77 \times 10^{-3}$
C.V. (%)		39,46	106,17	66,41	57,43

C.V.: coeficiente de variação. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

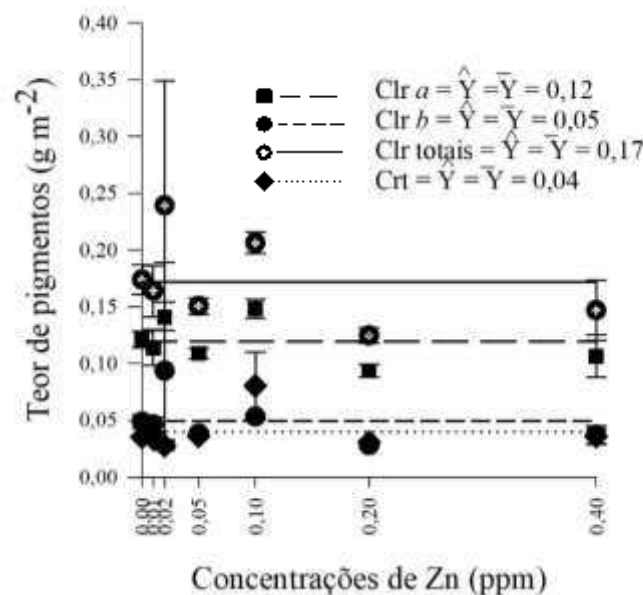


Figura 24 – Teores foliares de pigmentos fotossintéticos em plantas de alface em função da concentração de Zn na solução nutritiva. Clr a: clorofila a; Clr b: clorofila b; Clr totais: clorofilas totais; Crt: carotenoides.

5.4.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Os teores foliares de Mg, Zn, Fe, Mn, B e Cu foram significativamente afetados pelas concentrações de Zn na solução nutritiva (Tabela 25), embora não tenha sido possível encontrar modelos para todos (Figuras 24 e 25). O aumento da concentração de Zn na solução nutritiva aumentou de forma sigmoideal o teor de Zn na parte aérea das alfaces e de forma linear o teor de Cu. Os teores médios de N, P, K, Ca, Mg e S foram respectivamente de 37,96, 8,12, 70,96, 10,79, 3,23 e 1,21 g kg^{-1} (Figura 24) e os de Fe, B e Mn foram de 92,96, 54,10 e 57,57 mg kg^{-1} , respectivamente (Figura 25).

Tabela 25 - Resumo da análise de variância dos teores médios dos macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento da colheita, em função de diferentes concentrações de Zn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios					
		Teores de macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Trat.	6	1,71 ^{ns}	0,34 ^{ns}	90,84 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,71 ^{**}	0,06 ^{ns}
Resíduo	21	3,71	0,19	58,47	0,51	0,06	0,03
C.V. (%)		5,09	5,37	10,78	6,61	7,60	14,43
		Teores de micronutrientes					
		Zn	Fe	Mn	B	Cu	
Trat.	6	3304,60 ^{**}	364,42 [*]	804,08 ^{**}	109,99 ^{**}	10,11 ^{**}	
Resíduo	21	14,3	140,62	25,12	16,17	0,41	
C.V. (%)		10,79	12,88	8,71	7,43	13,47	

C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

Os conteúdos de K, Zn, Mn e B foram afetados pela concentração de Zn na solução nutritiva (Tabela 26), mas apenas para o conteúdo de Zn foi possível encontrar modelo, no caso sigmoidal (Figuras 24 e 25). Os conteúdos médios de N, P, K, Ca, Mg e S foram respectivamente de 0,43, 0,09, 0,80, 0,12, 0,36 e 0,0137 g/planta (Figura 24) e os de Cu, Fe, B e Mn foram de 0,07, 1,04, 0,61 e 0,64 g/planta (Figura 25).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância dos conteúdos médios de macro e micronutrientes das plantas de alface, no momento de colheita, em função de diferentes concentrações de Zn na solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios		
		Conteúdos de macronutrientes		
		N	P	K
Tratamento	6	1,57x10 ^{4ns}	631,67 ^{ns}	7,36x10 ^{4*}
Resíduo	21	6,57x10 ³	286,36	2,30x10 ⁴
C.V. %		19,73	19,26	19,59 x10 ⁴
		Conteúdos de macronutrientes		
		Ca	Mg	S
Tratamento	6	1,24x10 ^{3ns}	28,94 ^{ns}	21,68 ^{ns}
Resíduo	21	4,89x10 ²	69,50	8,84 ^{ns}
C.V. (%)		19,00	24,24	22,88
		Conteúdos de micronutrientes		
		Zn	Fe	Mn
Tratamento	6	0,43**	0,02 ^{ns}	0,10**
Resíduo	21	2,09x10 ⁻³	0,03	4,67x10 ⁻³
C.V. (%)		11,61	15,64	10,61
		Conteúdos de micronutrientes		
		B	Cu	
Tratamento	6	0,035**	0,01 ^{ns}	
Resíduo	21	3,88x10 ⁻³	0,02	
C.V. (%)		10,20	124,85	

C.V.: coeficiente de variação. * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F;
^{ns} Não significativo a 5% pelo teste F.

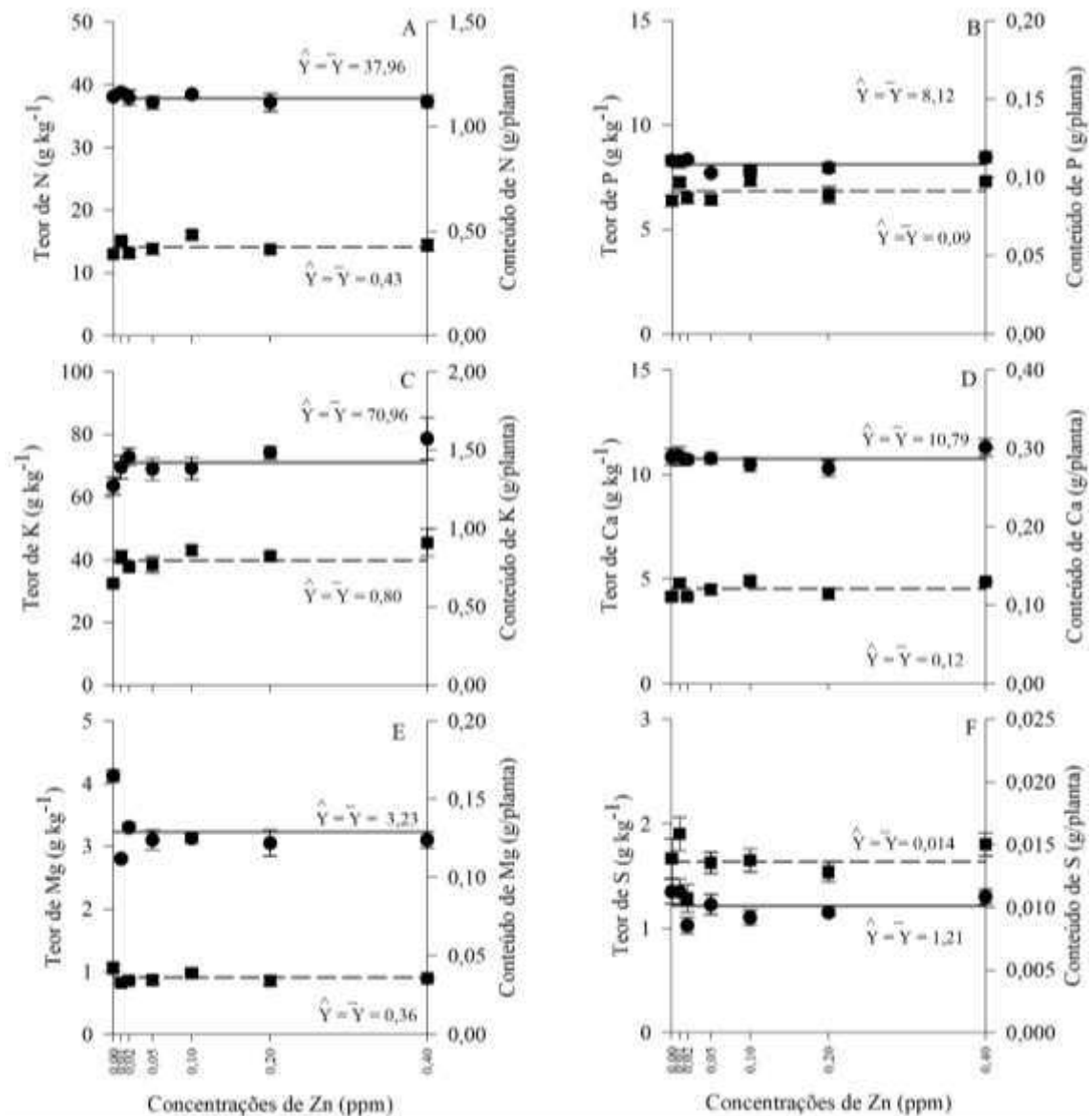


Figura 25 – Teores e conteúdos de macronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Zn na solução nutritiva. A – nitrogênio; B – fósforo; C – potássio; D – cálcio; E – magnésio e F – enxofre. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes.

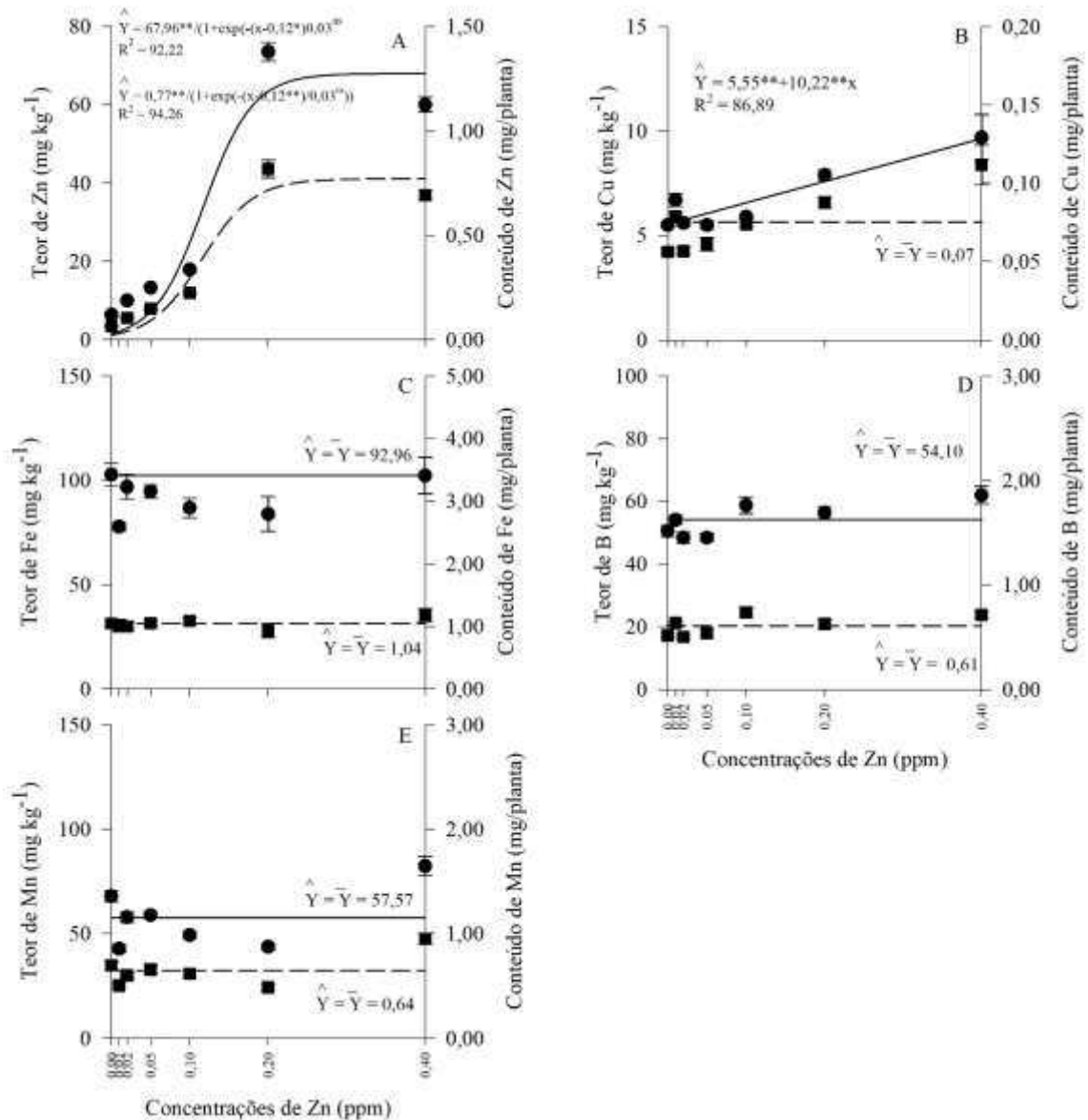


Figura 26 - Teores e conteúdos de micronutrientes da parte aérea de alface submetidas a diferentes concentrações de Zn na solução nutritiva. A – zinco; B – cobre; C – ferro; D – boro e E – manganês. Círculo e linha contínua referem-se a teor e quadrado e linha pontilhada referem-se ao conteúdo de nutrientes. . * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

5.5 Resumo dos experimentos com Ca, Cu, Mn e Zn

As concentrações de nutrientes que proporcionaram 90% do máximo crescimento (C90) foram de 95,60 ppm para o Ca, 0,19 ppm para o Cu e de 0,0047 ppm para o Zn, sendo utilizadas, portanto, no último experimento. Para o caso do Mn, que não permitiu estimar-se a C90, adotou-se a menor concentração testada (0,07 ppm) para o experimento contendo todas as quatro fontes de nanofertilizantes.

5.6 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes

5.6.1 Crescimento

À exceção da RAF, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis de crescimento (Tabela 27). No caso da RAF, ela foi menor na S3 quando comparada a S2 (Tabela 28), provavelmente devido ao maior peso de matéria seca do caule, uma vez que não foram verificadas diferenças na AFE.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância das variáveis de crescimento de plantas de alface em função da solução nutritiva empregada no cultivo de alface em NFT

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios				
		MF	MFA	MS	MFA	NT
Tratamento	2	1305,11 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,99 ^{ns}	2,54 ^{ns}
Resíduo	21	642,78	0,56	1,23	1,42	4,99
C.V. (%)		9,39	4,43	9,54	8,88	7,81
		NF>10 cm	AF	AFE	RAF	
Tratamento	2	0,88 ^{ns}	1,47x10 ^{6ns}	1,46x10 ^{4ns}	1,29x10 ^{4*}	
Resíduo	21	2,68	5,61x10 ⁵	4,50x10 ³	2,59x10 ³	
C.V. (%)		7,61	9,88	10,26	8,96	

MF: matéria fresca de folhas; MFA: matéria fresca de parte aérea; MS: matéria seca de folhas; MFA: matéria seca de parte aérea; NT: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; C.V.: coeficiente de variação. * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 7 – Valores médios das variáveis de crescimento das plantas de alface cultivadas em três soluções nutritivas (S1: melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizantes isolados; S2: concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais; S3: concentrações recomendadas por Hoagland e Arnon (1950), mas aplicando fertilizantes convencionais.

Variáveis	Soluções nutritivas			C.V. %
	S1	S2	S3	
MFF	268,42a	283,45a	258,05a	9,39
MFPA	303,36a	323,10a	299,37a	4,43
MSF	11,49a	11,61a	11,84a	9,54
MSPA	13,08a	13,34a	13,78a	8,88
NTF	29,00a	29,00a	28,00a	7,81
NF>10 cm	22,00a	22,00a	21,00a	7,61
AF	7.465,46a	8.059,49a	7.228,63a	9,88
AFE	651,72a	698,24a	612,91a	10,26
RAF	571,03ab	606,33a	526,25b	8,96

MFF: matéria fresca de folhas; MFPA: matéria fresca de parte aérea; MSF: matéria seca de folhas; MSPA: matéria seca de parte aérea; NTF: número total de folhas; NF>10 cm: número de folhas maiores que 10 cm; AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: razão de área foliar; C.V.: coeficiente de variação. Para cada variável, médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, (n=8).

5.6.2 Trocas gasosas e teores foliares de pigmentos

As trocas gasosas (A, g_s , E, A/E e C_i/C_a) e teores foliares de pigmentos fotossintéticos (clorofilas a, b e totais, e de carotenoides) não foram afetados pelas diferentes soluções nutritivas testadas (Tabela 29 e Figura 26).

Tabela 29 - Resumo da análise de variância referente à taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência instantânea no uso de água (A/E), relação entre as concentrações interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) e teores foliares de pigmentos fotossintéticos em plantas de alface em função da solução nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados médios				
		Trocas gasosas				
		A	g_s	E	A/E	C_i/C_a
Bloco	7	6,56 ^{ns}	8,83x10 ³ ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Tratamento	2	14,58 ^{ns}	4,40x10 ³ ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,12 ^{ns}
Resíduo	14	10,92	1,36x10 ⁴	1,20	0,09	0,03
C.V. (%)		29,14	69,52	15,59	18,19	29,16
		Teores foliares de pigmentos				
		Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas totais	Carotenoides	
Tratamento	2	2,29x10 ⁻⁴ ^{ns}	1,65x10 ⁻⁵ ^{ns}	3,70x10 ⁻⁴ ^{ns}	3,47x10 ⁻⁵ ^{ns}	
Resíduo	21	1,09x10 ⁻⁴	9,42x10 ⁻⁵	3,48x10 ⁻⁴	1,05x10 ⁻⁵	
C.V. (%)		13,77	26,53	16,21	14,56	

C.V.: coeficiente de variação. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

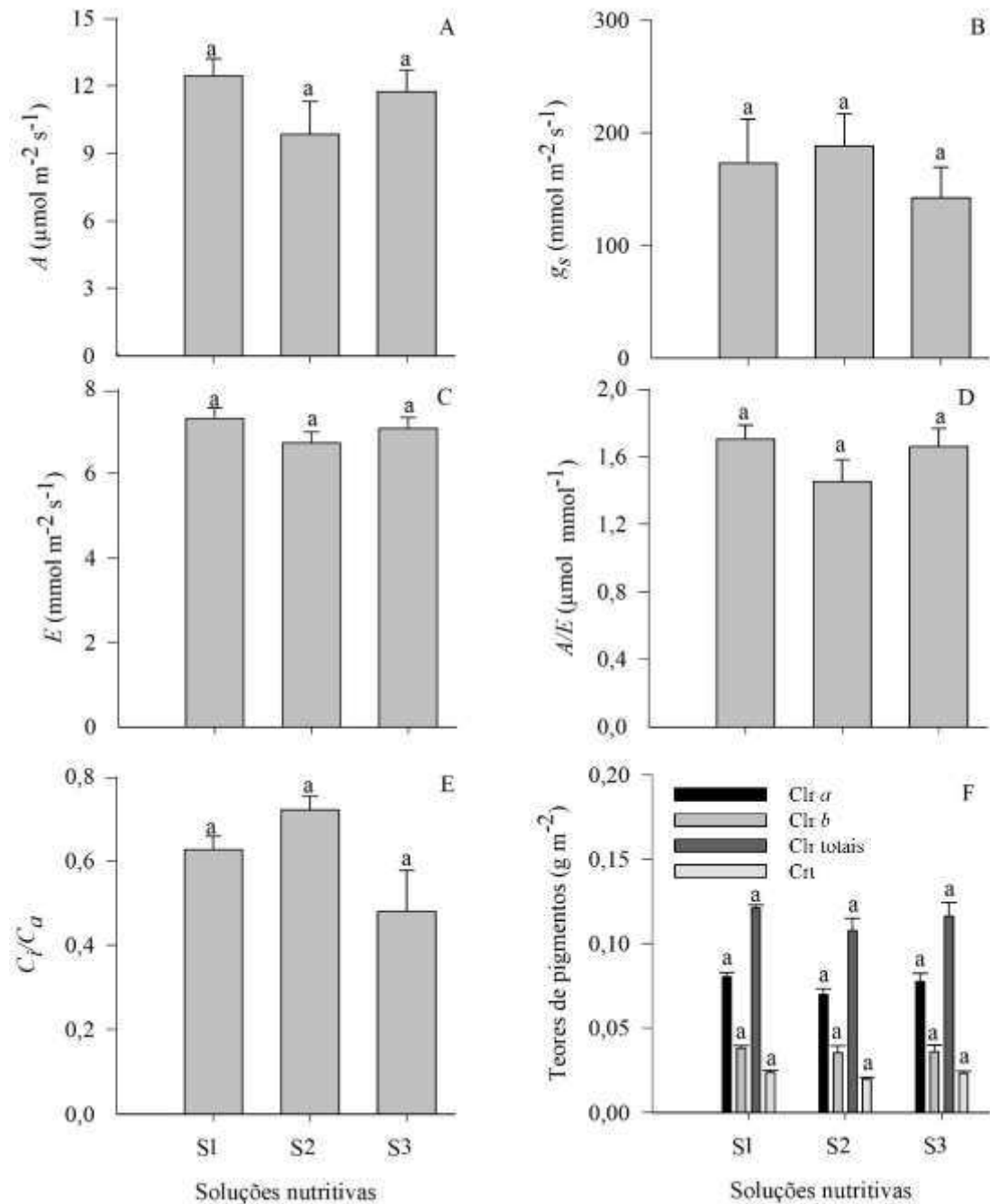


Figura 27 - Efeito das soluções nutritivas (S1: melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizante isolado; S2: concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais; S3: concentrações recomendadas por Hoagland e Arnon (1950), aplicando fertilizantes convencionais) sobre as trocas gasosas e teores de pigmentos fotossintéticos em plantas de alface, avaliadas aos 29 dias pós o transplante. A – taxa de assimilação líquida de CO₂ (A); B - condutância estomática (g_s); C - transpiração (E); D - eficiência instantânea do uso da água (A/E); E - relação C_i/C_a e F - teores foliares de pigmentos (Clr a: clorofila a; Clr b: clorofila b; Clr totais: clorofilas totais; Crt: carotenoides). Para cada variável, barras seguidas de mesma letra indicam que não há diferença entre as soluções nutritivas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, (n=8).

5.6.3 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Não houve diferença nos teores de N, S, Cu, B e Fe entre as plantas tratadas com as diferentes soluções nutritivas (Tabela 30). O teor de P nas plantas tratadas com a S1 foi maior, enquanto os teores de Ca, Mg, Mn foram maiores com o uso de fertilizantes convencionais, nas concentrações sugeridas nesse trabalho (S2). O teor de K não variou entre S1 e S2, e a S3 proporcionou o maior teor de Zn (Tabela 30).

Tabela 30 – Teores e conteúdos médios de macro e micronutrientes, no momento da colheita, na parte aérea de alfaces cultivadas com diferentes soluções nutritivas (S1: melhores concentrações encontradas nos experimentos com nanofertilizantes isolados; S2: concentrações muito próximas à anterior, mas aplicando fertilizantes convencionais; S3: concentrações recomendadas por Hoagland e Arnon (1950), mas aplicando fertilizantes convencionais).

Nutrientes	Soluções			C.V.
	S1	S2	S3	
Teores de macronutrientes (g kg ⁻¹)				
N	37,46a	37,05a	37,53a	6,21
P	10,26a	8,80c	9,33b	3,67
K	72,40a	68,80a	60,15b	8,14
Ca	12,96b	16,00a	11,03c	6,51
Mg	4,88b	5,38a	4,38c	5,23
S	2,35a	2,39a	2,44a	13,80
Teores de micronutrientes (mg kg ⁻¹)				
Cu	11,45a	11,60a	13,05a	17,41
Mn	52,70b	105,50a	43,55b	10,43
Zn	13,85b	33,20b	87,00a	48,73
B	43,81a	41,53a	45,04a	8,04
Fe	72,20a	81,55a	88,80a	33,05
Conteúdos de macronutrientes (g/planta)				
N	0,490a	0,490a	0,510a	9,440
P	0,130a	0,120b	0,130ab	8,900
K	0,950a	0,920a	0,830a	13,140
Ca	0,170b	0,210a	0,150b	11,020
Mg	0,064ab	0,072a	0,060b	9,790
S	0,034a	0,031a	0,034a	18,500
Conteúdos de micronutrientes (mg/planta)				
Cu	0,150a	0,160a	0,180a	18,770
Mn	0,690b	1,410a	0,600b	16,580
Zn	0,180b	0,460b	1,190a	49,590
B	0,570a	0,550a	0,620a	10,900
Fe	0,940a	1,090a	1,200a	31,020

C.V.: coeficiente de variação. Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, (n=8).

Não houve diferença de conteúdo de N, K, S, Cu, B e Fe nas plantas cultivadas com as diferentes soluções (Tabela 30). O conteúdo de P foi maior nas plantas cultivadas com S1 comparado às cultivadas com S2. O conteúdo de Ca foi maior nas plantas cultivadas com S2 em comparação a S1 e S3. O conteúdo de Mg foi maior nas plantas cultivadas com S2 comparada às cultivadas com S3. O maior conteúdo de Mn e Zn foi encontrado nas plantas tratadas com S2 e S3, respectivamente.

A acúmulo dos macronutrientes seguiu uma mesma ordem decrescente para as três soluções, $K > N > Ca > P > Mg > S$. Entretanto, para os micronutrientes, a ordem variou com a solução testada: S1: $Fe > Mn > B > Zn > Cu$; S2: $Mn > Fe > B > Zn > Cu$ e S3: $Fe > Zn > B > Mn > Cu$ (Tabela 30).

6. DISCUSSÃO

6.1 Experimentos com nanofertilizantes à base de Ca, Cu, Mn e Zn testados isoladamente

6.1.1 Crescimento

As plantas de alface apresentaram crescimento inicial lento, seguido de um crescimento rápido após 20 DAT. As variáveis de crescimento absoluto da alface apresentaram um padrão exponencial de crescimento, que foi o mesmo padrão observado por Vieira (2016). De fato, esse é um padrão comum em hortaliças que estão em estádios de crescimento e desenvolvimento (ZUFFO et al., 2016).

Ao longo do ciclo da alface verificaram-se reduções na AFE e na RAF, que ficaram bem explícitas no experimento com Mn, e mais discretamente, nos experimentos com Ca e Zn. As reduções na AFE e RAF eram esperadas, pois o crescimento das plantas aumenta o autossombreamento, causando reduções na área foliar útil, porém com incrementos na matéria seca de folhas e total (BENINCASA, 2003). O autossombreamento também é tido como um dos responsáveis por reduções na TCR e na TAL, cuja importância aumenta com o final do ciclo produtivo da alface. Ademais, o aumento da atividade respiratória (MILTHORPE; MOORBY, 1974) contribui para redução na TCR.

As TCA das plantas de alface, em todos os experimentos realizados, se assemelharam ao encontrado por Silva et al. (2018) para a cultivar Vanda®: maiores valores de TCA a partir de 15 DAT, verificando que quando a cultura se aproxima do ponto de colheita sua TCA aumenta.

Isoladamente, apenas a MFPA apresentou efeito significativo quanto à concentração de Ca, possivelmente por se tratar de macronutriente houve resposta quadrática ao aumento da concentração do nutriente. Ademais, o efeito das concentrações dos nanofertilizantes testadas foi inexpressivo sobre as variáveis avaliadas para Mn e Zn.

6.1.2 Superfícies de resposta: C100 e C90

Os resultados encontrados no experimento com Ca apontaram para C100 de 172,18 ppm e C90 de 95,60 ppm. Esses valores estão, respectivamente, um pouco acima e abaixo do recomendado por Hoagland e Arnon (1950), que é de 160 ppm. Ainda, Furlani (1998) recomendou valor um pouco superior ao C90, 114 ppm. Os resultados encontrados no experimento com Cu apontaram para C100 de 0,32 ppm e C90 de 0,19 ppm. Esses valores estão muito acima do recomendado por Hoagland e Arnon (1950) que é de 0,075 ppm.

No experimento com Mn, como não foi possível estabelecer as C100 e C90, sugeriu-se a concentração de 0,07 ppm (concentração mínima testada, porém diferente de zero), como uma “concentração de segurança”. Esse valor (0,07 ppm) está abaixo do recomendado por Hoagland e Arnon (1950), que é de 0,50 ppm. Os resultados encontrados no experimento com Zn apontaram para C100 de 0,26 ppm e C90 de 0,0047 ppm. Esses valores estão, respectivamente, acima e abaixo do recomendado por Hoagland e Arnon (1950), que é de 0,05 ppm. Sago et al. (2018) sugerem a concentração de 0,065 ppm para produção de baby leaf de alface vermelha.

O fato de terem sido encontradas concentrações inferiores às tradicionalmente recomendadas para Ca, Mn e Zn, e superior para Cu pode estar relacionado às características do nanofertilizante e da espécie (REDDY et al., 2016; LIU et al., 2016; VANKOVA et al., 2017; DIMKPA; BINDRABAN, 2018; GARCÍA-GÓMEZ et al., 2018; YUSEFI-TANHA et al., 2020). É importante ressaltar que as recomendações de Hoagland e Arnon (1950) e Furlani (1998) são recomendações generalistas, podendo sofrer variações dos valores recomendados conforme o tempo de exposição à nanopartícula (SHAH; BELOZEROVA, 2009) e variedade (SAGO et al., 2018), como visto acima.

Tanto a deficiência quanto o excesso de Ca comprometeram o crescimento da planta de alface. Na concentração zero observaram-se sintomas típicos da deficiência de Ca, conhecido como "tipburn", que é a necrose do ápice e das margens das folhas novas em crescimento ativo. Ademais, embora as plantas com deficiência tenham produzido elevado número total de folhas (média de 31 folhas), a maioria delas era pequena e muito lesionada, impróprias para comercialização. O cálcio é um mineral fundamental para a obtenção de plantas dotadas de grande área foliar (SILVA et al., 2011), estabelecendo condições para alta atividade fotossintética, visando à produção de massa foliar. Portanto, na carência desse nutriente há considerável redução na área foliar como pode ser visto na Figura 5.

Os modelos ajustados para o experimento com Cu mostraram incremento da MFF, MFPA, MSF, MSPA, NTF, NF>10 cm e AF em resposta à concentração crescente de Cu na solução nutritiva, e ligeira diminuição dessas variáveis após atingirem seu máximo crescimento absoluto, na respectiva C100 (Tabela 13). Entretanto, não foram visíveis outros sintomas de deficiência (clorose nas folhas novas) ou de toxidez (coloração escura das raízes). De acordo com os resultados deste estudo, a aplicação crescente de Cu após a C100 diminuiu a área foliar e a matéria seca da planta.

Isso foi semelhante ao achado de Shams et al. (2019) que argumentaram que as plantas de alface consumiram mais energia para mitigar o efeito adverso da toxicidade do

Cu, indicando assim uma diminuição dos parâmetros de crescimento morfológicos. Ademais, a redução observada dos parâmetros de crescimento (Figura 11) pode ter sido resultado do acúmulo de Cu nos tecidos da parte aérea da alface (Figura 14). Esse resultado está de acordo com trabalho anterior feito por Da Costa e Sharma (2016) sobre o efeito de Cu no crescimento da planta de arroz. Outro estudo também relata inibição no crescimento de alface sob excesso desse micronutriente (XIONG et al., 2017). Efeito da toxicidade de 20 ppm de Cu nanoparticulado foi observado sobre o crescimento radicular de mudas de alface (cultivar Simpson), mas não em plantas de alfafa, sugerindo respostas interespecíficas à toxicidade por Cu (HONG et al., 2015).

Para o Cu, a cultivar respondeu melhor a uma concentração superior ao recomendado por Hoagland e Arnon (1950), quando utilizado como fonte fertilizante nanoparticulado, o que apoia a hipótese de que nem todos os nanofertilizantes apresentam maior eficiência que fertilizantes convencionais (KOPITTKKE et al., 2019).

As concentrações de Mn aplicadas não foram nem insuficientes nem fitotóxicas para a alface. Pradhan et al. (2013) também não constataram efeitos fitotóxicos em plantas de feijão após tratamento de sementes com Mn nanoparticulado, mas detectaram toxidez desse nutriente quando ele foi fornecido, mesmo em concentrações menores, na forma de sal de manganês. Sementes de alface tratadas com 50 ppm de Mn nanoparticulado resultaram em plântulas de alface com mais de 50% de alongamento radicular das mudas, comparadas às sementes tratadas com água deionizada (LIU et al., 2016), enquanto que sementes de feijão embebidas em solução de 0,05 ppm de Mn nanoparticulado promoveu incrementos nas matérias fresca e seca das plantas (PRADHAN et al., 2013).

Concentrações de Zn acima de 0,22 ppm causaram redução na MFF, MSPA, NF>10 cm e AF, possivelmente devido à produção de EROs, induzida pelas nanopartículas de Zn (SHARIFAN et al., 2019). Ademais, em *Arabidopsis* verificaram-se redução na concentração de hormônios (citocinina, AIA, ácido jasmônico e ABA) que contribuíram para menor crescimento da parte aérea em resposta às crescentes concentrações (de 0 a 100 ppm) de Zn nanoparticulado (VANKOVA et al., 2017). Sago et al. (2018) também observaram redução da matéria fresca de alface com o aumento da concentração de Zn. Diferente desses trabalhos, a fitotoxidez de Zn foi observada em concentração muito elevada (100 ppm) na solução nutritiva, reduzindo em 57% a matéria seca da parte aérea da alface romana (SHARIFAN et al., 2019).

O uso de nanopartículas de Zn também incrementou a biomassa de alface plantada no solo (XU et al., 2018). Por outro lado, Liu et al. (2016) não observaram benefícios

significativos da adubação com nanopartículas de ZnO na germinação de sementes de alface lisa, o que pode sugerir que baixos níveis de Zn são suficientes nos primeiros estágios de crescimento.

As deficiências de Ca e Cu limitaram o crescimento das plantas de alface, entretanto, para Mn e Zn isso não foi observado. Esse resultado pode ser intrínseco à variedade, uma vez que alface do grupo crespa mostrou-se mais tolerante às deficiências de Fe, Mn e Zn que aquelas do grupo lisa, quando foi quantificada a produção de matéria seca, eficiência do FS II, transporte de elétrons, rendimento quântico e os níveis de osmorreguladores (ROOSTA et al., 2018).

6.1.3 Trocas gasosas, teores foliares de pigmentos

Aparentemente, o menor crescimento em concentrações baixas ou em concentrações elevadas de Ca ocorreram independentemente de limitações nas trocas gasosas, medidas de forma instantânea, e de reduções nos teores foliares de pigmentos fotossintéticos. Todavia, o aumento nas concentrações de Cu reduziu a A e a A/E. O impacto do Cu na fotossíntese tem sido associado à destruição da integridade da membrana do cloroplasto (ELEFThERIOU; KARATAGLIS, 1989), deformação dos tilacoides (DA COSTA; SHARMA, 2016) e formação de EROs (GONG et al., 2019).

As concentrações de Mn não afetaram as trocas gasosas. Diferentemente desse trabalho, Przybysz et al. (2017) encontraram redução nas trocas gasosas nas alfaces cv. Locarno® e Satine® em resposta ao aumento de sal de manganês ($MnSO_4$) na solução nutritiva.

As concentrações de Cu nanoparticulado não afetaram os teores de clorofila a, b e total e nem os de carotenoides, corroborando resultados de Zhao et al. (2016), Bonilla-Bird et al. (2020) e Wang et al. (2020). Embora elevado teor de Mn usualmente tem efeito positivo no teor de clorofila (PRZYBYSZ et al. 2017), no presente trabalho e no de Przybysz et al. (2017) com cv. Satine®, não foram observados efeitos das concentrações de Mn sobre o índice de conteúdo de clorofila. Roosta et al. (2018) observaram que a deficiência de Mn reduziu os teores de clorofilas a, b e totais nas alfaces crespa e lisa, o que sugere que neste experimento, mesmo as concentrações mais baixas forneceram nutrientes suficientes para as plantas.

Embora o Zn também possa estimular a biossíntese de clorofilas e de carotenoides e melhorar o aparato fotossintético das plantas (ARAVIND; PRASAD, 2004), no presente trabalho as variações dos teores foliares desses pigmentos não foram significativas. De fato,

alta concentração de nanopartículas de Zn (3.200 ppm) em milho cultivado no solo reduziu os teores de pigmentos fotossintéticos, enquanto que concentrações de 100 e 1.600 ppm não interferiram nos teores dos pigmentos (LIU et al. 2015). Diferentemente, Roosta et al. (2018) observaram que a deficiência de zinco reduziu os teores de clorofilas a, b e totais na alface, mas também não observaram redução no teor de carotenoides.

6.1.4 Teores e conteúdos de macro e micronutrientes

Nos experimentos isolados com Ca, Cu, Mn e Zn, o aumento da concentração desses nutrientes na solução nutritiva levou ao aumento do teor do nutriente na parte aérea da planta. As concentrações de Ca abaixo de 52,37 ppm resultaram em plantas com teor de Ca na parte aérea da alface abaixo da faixa sugerida por Hartz e Johnstone (2007), enquanto concentrações acima de 144,64 ppm resultaram em plantas com teor acima da faixa de suficiência. Dessa forma, a C90 ficou dentro da faixa de suficiência e correspondeu ao melhor crescimento da alface. O aumento da concentração de Ca na solução nutritiva diminuiu o teor de S e Cu em relação ao tratamento sem adição de Ca, apresentando os menores valores nas concentrações de 319,2 ppm e a partir de 159,6 ppm de Ca, respectivamente. O efeito antagônico na absorção de Ca e Cu pode ter sido devido aos nutrientes apresentarem propriedades físico-químicas semelhantes (MALAVOLTA et al., 1997).

As concentrações foliares de Cu refletiram os níveis de sua oferta na solução nutritiva. Concentrações abaixo de 0,07 ppm e acima de 0,16 ppm de Cu levaram ao acúmulo desse nutriente fora da faixa de suficiência sugerida por Hartz e Johnstone (2007). Embora a C90 de Cu (0,19 ppm) levou a um acúmulo do nutriente acima da faixa de suficiência, esse acúmulo não foi capaz de causar danos às plantas, pois essa concentração correspondeu àquela que proporcionou o melhor crescimento das plantas. Embora não tenha sido encontrado diferença no teor dos demais nutrientes (SHAMS et al. 2019), reduções nos conteúdos de N, P e Ca ocorreram devido à redução de biomassa observada nas concentrações extremas de Cu. Adicionalmente, os conteúdos de K, Fe, Mn e B foram menores nas menores concentrações de Cu.

Przybysz et al. (2017) também observaram maior concentração de Mn nas folhas de alface com o aumento da concentração do nutriente na solução nutritiva, e concentrações de K, Ca e Mg quase inalterados. Embora a concentração de Mn na parte aérea tenha aumentado com o aumento de sua concentração na solução nutritiva, não houve diferenciação de acúmulo de biomassa, possivelmente porque não houve aumento dos teores de

macronutrientes. Com relação aos macro e micronutrientes (exceto Mn), os resultados mostraram que as concentrações externas de Mn não afetaram os níveis desses nutrientes na parte aérea da alface. Isso permite sugerir que os mecanismos de absorção e translocação dos demais nutrientes não foram vulneráveis aos níveis de Mn testados. Concentrações entre 0,21 ppm e 0,34 ppm de Mn produziram plantas de alface com teor de Mn dentro da faixa de suficiência para esse nutriente. A concentração sugerida de 0,07 ppm proporcionou um teor de 16,61 mg kg⁻¹, e embora esse valor esteja abaixo da faixa de suficiência, não houve prejuízos produtivos ou fisiológicos na planta, garantindo, mesmo em menor concentração na solução nutritiva, o crescimento da planta (PRADHAN et al., 2013, YUSEFI-TANHA et al., 2020).

Concentrações de Zn na solução nutritiva abaixo de 0,10 ppm produziram plantas com teor desse nutriente abaixo da faixa de suficiência, e as demais concentrações testadas não atingiram o limite máximo da faixa proposta por Hartz e Johnstone (2007). A concentração de Zn também parece não ter influenciado a absorção e translocação dos demais nutrientes, exceto Cu. Concentrações acima de 0,30 ppm de Zn na solução nutritiva resultaram em teor de Cu na parte aérea da alface acima da faixa de suficiência e as demais concentrações testadas proporcionaram teor de Cu dentro da faixa de suficiência desse nutriente. Assim como ocorrido no experimento de Mn, no experimento com Zn a C90 proporcionou teor de Zn abaixo da faixa de suficiência, porém sem comprometer o crescimento das plantas de alface.

6.2 Experimento com as melhores concentrações dos nanofertilizantes

Tanto a solução nutritiva contendo simultaneamente os quatro nutrientes nanoparticulados (S1) quanto aquela formulada com todas as fontes sendo de fertilizantes convencionais (S2), ambas com as mesmas concentrações de nutrientes indicadas nos ensaios individuais (95,60 ppm de Ca, 0,19 ppm de Cu, 0,07 ppm de Mn e 0,0047 ppm de Zn) possibilitaram igualmente a produção de alfaces crespas em sistema NFT. É possível afirmar isso, pois para todas as variáveis de crescimento absoluto não houve diferença entre esses tratamentos (S1 e S2) e o S3, cuja solução, comumente empregada nos cultivos comerciais de alface hidropônica, apresentava exatamente os teores de nutrientes propostos por Hoagland e Arnon (1950), preparada com fertilizantes convencionais. Ou seja, mesmo com a redução das concentrações dos nutrientes na solução nutritiva, obteve-se a mesma produtividade.

Registrem-se que as variações da RAF entre tratamentos não foram suficientes para considerar as plantas cultivadas sob S3 melhores que as demais (S1 e S2), pois decorreram

do aumento da matéria seca do caule (no caso do S3, em comparação aos demais) e não das folhas, que representam o interesse comercial (ZHAO et al., 2016). O crescimento estatisticamente igual das plantas de alface nesse experimento sugere que as concentrações de Ca, Mn e Zn na solução nutritiva possam ser reduzidas e a de Cu aumentada. Ademais, as trocas gasosas e teores de pigmentos não foram influenciados pelos tratamentos (S1, S2 e S3) aplicados nas plantas de alface.

Ordem semelhante de acúmulo de macronutrientes foi observada por Kano et al. (2011), com exceção da inversão do P e do Mg. Os três tratamentos apresentaram teor de Ca acima da faixa de suficiência estabelecida por Hartz e Johnstone (2007). A menor concentração de Ca nas soluções S1 e S2 podem ter contribuído para maior absorção de K (MALAVOLTA et al., 1997). O Ca aplicado em nanopartícula na solução nutritiva S1 promoveu o mesmo crescimento e menor teor dele na parte aérea da alface comparado a S3 (maior concentração de Ca), o que pode indicar maior eficiência metabólica, mesmo com menor nível dele no tecido.

Os teores de Cu, B, Fe não variaram entre as plantas e ficaram acima (Cu e B) e abaixo (Fe) da faixa de suficiência recomendada por Hartz e Johnstone (2007). Os teores de Mn e Zn variaram entre as plantas. Na S1, o teor de Mn ficou dentro da faixa de suficiência recomendada e o de Zn abaixo; na S2 o teor de Mn ficou acima e o de Zn dentro da faixa de suficiência recomendada; e na S3 o teor de Mn ficou abaixo e o de Zn acima da faixa de suficiência recomendada. Diferente desse trabalho, foi encontrado maior teor de Zn em folhas de alface tratadas com nanopartículas que com fertilizante convencional na mesma concentração, e, também, não houve incremento de biomassa devido a fonte de fertilizante (XU et al., 2018). A S3 promoveu maior teor e maior conteúdo de Zn nas plantas de alface. Evidentemente, esse resultado é uma consequência direta da concentração desse nutriente na solução nutritiva. Para o Mn, o nanofertilizante mostrou-se mais eficiente, pois mesmo em menor concentração na solução sua absorção foi igual àquela verificada com fertilizante convencional, em uma concentração maior na solução nutritiva.

7. CONCLUSÕES

É possível produzir alfaces crespas em NFT com solução nutritiva à base de fertilizantes nanoparticulados.

As concentrações de nanopartículas de Ca, Cu, Mn e Zn na solução nutritiva não afetaram os teores foliares de pigmentos fotossintéticos e as trocas gasosas, à exceção da redução verificada em A e A/E com o aumento da concentração de Cu.

O aumento da concentração de nanopartículas de Ca, Cu, Mn e Zn na solução nutritiva aumentou os teores desses elementos na parte aérea da planta de alface.

A concentração dos fertilizantes nanoparticulados de Ca, Cu e Zn que proporcionou 90% de crescimento máximo da alface foi respectivamente de 95,6 ppm, 0,19 ppm e 0,0047 ppm.

Não se verificou efeito das concentrações de Mn sobre o crescimento das plantas de alface. Por isso, adotou-se para Mn a concentração de 0,07 ppm.

Tanto S1 quanto S2 produziram alfaces com mesmas características produtivas e ecofisiológicas que S3, mesmo com menores concentrações de Ca, Mn e Zn.

Trabalhos futuros são necessários para estudar a produção de mudas de alface com omissão de nutrientes, a viabilidade financeira das soluções nutritivas à base de nanofertilizantes e a resposta morfofisiológica e produtiva de outros cultivares de alface.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. S. et al. Estratégias de uso de água salobra na produção de alface em hidroponia NFT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 491-498, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000500009.
- AMEH, T.; SAYES, C. M. The potential exposure and hazards of copper nanoparticles: a review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, 103220, 2019. DOI: 10.1016/j.etap.2019.103220.
- ARAVIND, P.; PRASAD, M. N. V. Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a freshwater macrophyte. **Plant Science**, v. 166, p. 1321-1327, 2004. DOI:10.1016/j.plantsci.2004.01.011.
- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949. DOI: 10.1104/pp.24.1.1.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371-375, 1939. DOI: 10.1104/pp.14.2.371.
- BAILEY, D.; BILDERBACK, T.; BIR, D. **Water considerations for container production of plants**. NC State University Department of Horticultural Science Horticulture Information Leaflet, v. 557, 1999. 11p.
- BALA, R.; KALIA, A.; DHALIWAL, S. S. Evaluation of efficacy of ZnO nanoparticles as remedial zinc nanofertilizer for rice. **Jornal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 2, p. 379-389, 2019. DOI: 10.1007/s42729-019-00040-z.
- BARCELOS, J. “A hidroponia chegou para ficar” Quatro perguntas para Jorge Barcelos. [Entrevista concedida a] Luciana Moraes. **Revista Ecológico**, revista online, 108. ed. publicado em 21/05/2018. disponível em: <http://revistaecologico.com.br/revista/edicoes-antteriores/edicao-108/a-hidroponia-chegou-para-ficar>. Acesso em 03 set. 2020.
- BASLAM, M. et al. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for inducing the accumulation of major carotenoids, chlorophylls and tocopherol in green and red leaf lettuces. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 7, p. 3119–3128, 2011. DOI: 10.1007/s00253-012-4526-x.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41p.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, Recife, v. 8, p. 107-137, 2012.
- BONILLA-BIRD, N. J. et al. Effect of copper oxide nanoparticles on two varieties of sweetpotato plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 154, p. 277-286, 2020. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.06.009.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em

extrato de solo e plantas. **Revista Ceres**, v. 21, n. 1, p. 73-85, 1974.

CECCHERINI, G. J. et al. Avaliação de diferentes volumes de bandejas sobre o desenvolvimento de alface. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 30-36, 2018. DOI: 10.4322/2359-6643.08104.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Mapeamento e qualificação da cadeia produtiva das hortaliças no Brasil**. Brasília: CNA, 2017. 79 p.

COMETTI, N. N. et al. Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 2, p. 287-292, 2013. DOI: 10.1590/S0102-05362013000200018.

DA COSTA, M. V. J.; SHARMA, P. K. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 110-119, 2016. DOI: 10.1007/s11099-015-0167-5.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forest Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Nanofertilizers: new products for the industry? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 26, p. 6462-6473, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02150.

ELEFTHERIOU, E. P.; KARATAGLIS, S. Ultrastructural and morphological characteristics of cultivated wheat growing on copper polluted fields. **Botanica Acta**, v. 102, p. 134-140, 1989. DOI: 10.1111/j.1438-8677.1989.tb00081.x.

EMBRAPA HORTALIÇAS. **Embrapa lança nova variedade de alface tolerante ao calor**. 2019. Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/42735426/embrapa-lanca-nova-variedade-de-alface-tolerante-ao-calor#:~:text=s%C3%A3o%20folhas%20frescas,-,Prefer%C3%A2ncia%20dos%20consumidores,alface%20preferido%20pelos%20consumidores%20brasileiros>. Acesso em 09 set. 2020.

EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. New York: John Wiley & Sons, 1972. 412p.

FECHT-CHRISTOFFERS, M. M.; BRAUN, H. P.; LEMAITRE-GUILLIER, C. H. Effect of manganese toxicity on the proteome of the leaf apoplast in cowpea. **Plant Physiology**, v. 133, n. 4, p. 1935-1946, 2003. DOI: 10.1104/pp.103.029215.

FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia NFT**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1998, 30p. (Boletim técnico, 168).

FURLANI, P. R. et al. **Cultivo hidropônico de plantas: Parte 2 - Solução nutritiva**. 2009. Artigo em Hypertexto. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm. Acesso em 05 jan. 2021.

GARCÍA-GÓMEZ, C. et al. Comparative study of the phytotoxicity of ZnO nanoparticles and Zn accumulation in nine crops grown in a calcareous soil and an acidic soil. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 770-780, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.356.

GOMES, M. H. F. et al. Physicochemical characterization of fertilizers containing concentrated suspensions of CuO, MnCO₃ and ZnO. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 6, 2020. DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0384.

GONG, Q. et al. Effects of copper on the growth, antioxidant enzymes and photosynthesis of spinach seedlings. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 171, p. 771-780, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.016.

HARTZ, T. K.; JOHNSTONE, P. R. Establishing lettuce leaf nutrient optimum ranges through DRIS analysis. **HortScience**, v. 42, n. 1, p. 143-146, 2007. DOI: 10.21273/HORTSCI.42.1.143.

HEPLER, P. K.; WINSHIP, L. J. Calcium at the cell wall-cytoplasm interface. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 2, p. 147-160, 2010. DOI: 10.1111/j.1744-7909.2010.00923.x.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: California Agricultural Experiment Station, 1950. 347p.

HONG, J. et al. Toxic effects of copper-based nanoparticles or compounds to lettuce (*Lactuca sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*). **Environmental Science Processes and Impacts**, v. 17, n. 1, p. 177-185, 2015. DOI: 10.1039/c4em00551a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/523>. Acesso em: 05 mar. 2020.

JACOBSON, A. et al. Interactions between a plant probiotic and nanoparticles on plant responses related to drought tolerance. **Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 3, p. 148-156, 2018. DOI: 10.1089/ind.2017.0033.

KANO, C.; CARDOSO, A. I. I.; VILLAS BÔAS, R. L. Acúmulo de nutrientes pela alface destinada à produção de sementes. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 70-77, 2011. DOI: 10.1590/S0102-05362011000100012.

KOPITTKE, P. M. et al. Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. **Environmental Science: Nano**, v. 6, n. 12, p. 3513-3524, 2019. DOI: 10.1039/c9en00971j.

KŘÍSTKOVÁ, E. et al. Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. **Horticultural Science**, v. 35, n. 3, p. 113-129, 2008. DOI: 10.17221/4/2008-HORTSCI.

KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; VENEGAS, V. H. A. **Interpretação de resultados de análise foliar**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 42p.

- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
- LIU, X. et al. Bioavailability of Zn in ZnO nanoparticle-spiked soil and the implications to maize plants. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 17, 2015. DOI: 10.1007/s11051-015-2989-2.
- LIU, R.; ZHANG, H.; LAL, R. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or nanonutrients? **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 227, n. 42, 2016. DOI: 10.1007/s11270-015-2738-2.
- MAJID, M. et al. Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. **Agricultural Water Management**, 106572, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106572.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MAMPHOLO, B. M. et al. Phytochemicals and overall quality of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) varieties grown in closed hydroponic system. **Journal of Food Quality**, v. 39, n. 6, p. 805-815, 2016. DOI: 10.1111/jfq.12234.
- MARSCHINER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889p.
- MARTINEZ, H. E. P.; SILVA FILHO, J. B. da. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa: Editora Viçosa, 2004. 111p.
- MARTINEZ-MATE, M. A. et al. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farmproductive proposal in water scarcity areas: energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1298-1310, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.275.
- MEDEIROS, M. B. C. L. et al. Índice de Qualidade de Dickson e característica morfológica de mudas de pepino, produzidas em diferentes substratos alternativos. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 159-173, 2018. DOI: 10.18542/ragros.v10i1.5124.
- MENGEL, A.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4. ed. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 1987. 687p.
- MESQUITA, D. Z. et al. Desafios da extensão rural no Brasil: estudo de caso do Distrito Verde em Naviraí/MS. **Revista Mundi Meio Ambiente e Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 20-41, 2019.
- MILTHORPE, F. L.; MOORBY, J. **An introduction to crop physiology**. Cambridge, Grã-Bretanha: Cambridge University, 1974. 201p.
- MONTEIRO FILHO, A. F. et al. Production of lettuce genotypes in hydroponic system using different organo-mineral nutrient solutions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 3, p. 386-392, 2018a. DOI: 10.21475/ajcs.18.12.03.pne761.

- MONTEIRO FILHO, A. F. et al. Economic viability of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in hidroponic system with different optimized nutrient solutions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 3, p. 422-429, 2018b. DOI: 10.21475/ajcs.18.12.03.pne820.
- PAULUS, D.; DOURADO NETO, D.; PAULUS, E. Análise sensorial, teores de nitrato e de nutrientes de alface cultivada em hidroponia sob águas salinas. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 18-25, 2012. DOI: 10.1590/S0102-05362012000100004.
- PETRAZZINI, L. L. et al. Nutritional deficiency in crisphead lettuce grown in hydroponics. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 310-313, 2014. DOI: 10.1590/S0102-05362014000300012.
- PRADHAN, S. et al. Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on *Vigna radiata*: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 22, p. 13122–13131, 2013. DOI: 10.1021/es402659t.
- PRZYBYSZ, A. et al. Effect of manganese on yield and quality of hydroponically grown lettuce. **Journal of Elementology**, v. 22, n. 1, p. 315-327, 2017. DOI: 10.5601/jelem.2016.21.1.1127.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2019.
- RAWASHDEH, R. Y.; HARB, A. M.; ALHASAN, A. M. Biological interaction levels of zinc oxide nanoparticles; lettuce seeds as case study. **Heliyon**, v. 6, n. 5, e03983, 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03983.
- REDDY, P. V. L et al. Lessons learned: are engineered nanomaterials toxic to terrestrial plants? **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 470-479, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.042.
- ROCHA, J. D. S. et al. Avaliação de pré-tratamentos em espuma fenólica para produção de mudas de alface. In: FERTBIO 2000, Santa Maria, 2000. **Anais**. Santa Maria: SBCS, 2000. CD Rom.
- 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**, v. 56, n. 2, p. 606-615, 2018. DOI: 10.1007/s11099-017-0696-1.
- SAGO, Y.; WATANABE, N.; MINAMI, Y. Zinc biofortification of hydroponic baby leaf lettuce grown under artificial lighting with elevated wind speed and root zone temperature. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 74, n. 4, p. 173-177, 2018. DOI: 10.2480/agrmet.D-17-00048.
- SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 187-194, 2012. DOI: S0102-05362012000200002.
- SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, Depto Química, 1974. 56p.

SELMA, M. V. et al. Sensory quality, bioactive constituents and microbiological quality of green and red fresh-cut lettuces (*Lactuca sativa* L.) are influenced by soil and soilless agricultural production systems. **Postharvest Biology and Technology**, v. 63, n. 1, p. 16-24, 2012. DOI:10.1016/j.postharvbio.2011.08.002.

SHAH, V.; BELOZEROVA, I. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. **Water Air Soil Pollut**, v. 197, p. 143-148, 2009. DOI: 10.1007/s11270-008-9797-6.

SHAMS, M. et al. Growth, nutrient uptake and enzyme activity response of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to excess copper. **Environmental Sustainability**, v. 2, p. 67-73, 2019. DOI: 10.1007/s42398-019-00051-7.

SHARIFAN, H. et al. Zinc oxide nanoparticles alleviated the bioavailability of cadmium and lead and changed the uptake of iron in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Longifolia). **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 19, p. 16401-16409, 2019. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b03531A.

SIGMAPLOT. 2008. For windows, version 11.0. Systat Software, 2004.

SILVA, E. C.; LEAL, N. R.; MALUF, W. R. Avaliação de cultivares de alface sob altas temperaturas em cultivo protegido em três épocas de plantio na região Norte Fluminense. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 23, n. 2, p. 491-499, 1999.

SILVA, S. A.; MORAES, W. B.; SOUZA, G. S. Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. **IDESIA**, v. 29, n. 3, p. 53-58, 2011. DOI: 10.4067/S0718-34292011000300008.

SILVA, F. G. M. et al. Produção de massa seca de diferentes cultivares de alface em sistema hidropônico. In: ZUFFO, A. M.; STEINER, J.; AGUILERA, J.G. (org). **Impactos das Tecnologias nas Ciências Agrárias e Multidisciplinar**. 1.ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2018. p. 110-117. DOI: 10.22533/at.ed.567181510.

SOUZA, P. F. et al. Physiological differences of “Crocantela” lettuce cultivated in conventional and hydroponic systems. **Horticultura Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 101-105, 2019. DOI: 10.1590/S0102-053620190116.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2009. 819 p. ISBN 9788536316147.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION (UN DESA). **World population prospects 2019**. New York: United Nations, 2019. 40p.

VANKOVA, R. et al. ZnO nanoparticle effects on hormonal pools in *Arabidopsis thaliana*. **Science of the Total Environment**, v. 593, p. 535-572, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.160.

VIEIRA, J. C. B. **Desempenho de quatro cultivares de alface em diferentes ambientes e épocas de cultivo no município de Viçosa-MG**. 2016. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

WANG, Y. et al. Improvement of nutrient elements and allicin content in green onion (*Allium fistulosum*) plants exposed to CuO nanoparticles. **Science of the Total Environment**, v. 725, 138387, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138387.

XIONG, T. et al. Copper oxide nanoparticle foliar uptake, phytotoxicity, and consequences for sustainable urban agriculture. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 9, p. 5242-5251, 2017. DOI: 10.1021/acs.est.6b05546.

XU, J. et al. Evaluation of zinc oxide nanoparticles on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil bacterial community. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 6026–6035, 2018. DOI: 10.1007/S1156-017-0953-7.

YUSEFI-TANHA, E. et al. Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). **Science of the Total Environment**, v. 738, 140240, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140240.

ZHAO, L. et al. Metabolomics to detect response of lettuce (*Lactuca sativa*) to Cu(OH)₂ nanopesticides: oxidative stress response and detoxification mechanisms. **Environmental Science & Technology**, v. 50, p. 9697-9707, 2016. DOI: 10.1021/acs.est.6b02763.

ZHAO, L. et al. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, p. 1935–1947, 2020. DOI: 10.1021/acs.jafc.9b06615.

ZUFFO, A. M. et al. Análise de crescimento em cultivares de alface nas condições do sul do Piauí. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 145-153, 2016. DOI: 10.1590/0034-737X201663020005.