

## ESCALDADURA EM CAFEIROS SUPRIDOS COM MAGNÉSIO

Kaio Gonçalves de Lima Dias<sup>1</sup>; Paulo Tácito Gontijo Guimarães<sup>2</sup>; Antônio Eduardo Furtini Neto<sup>3</sup>; Cesar Henrique Caputo de Oliveira<sup>4</sup>; Gustavo Soares Tiburcio<sup>5</sup>; Helbert Rezende<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Bolsista do Consorcio Pesquisa Café, DSc, EPAMIG, Lavras – MG, kaiogld@gmail.com

<sup>2</sup> Pesquisador, DSc, EPAMIG, Lavras – MG, paulotgg@epamig.ufla.br

<sup>3</sup> Professor, DSc, UFLA, Lavras – MG, afurtini@dsc.ufla.br

<sup>4</sup> Mestrando em Fitotecnia, Eng. Agrônomo, UFLA, Lavras – MG, cesar\_caputo@yahoo.com.br

<sup>5</sup> Estudante de Agronomia, UFLA, Lavras – MG, ogustavo.soares@gmail.com

<sup>6</sup> Pós Doutorando, DSc, UFLA, Lavras – MG, herosrezende@yahoo.com.br

**RESUMO:** Sintomas de deficiência de magnésio têm sido cada vez mais frequentes em lavouras cafeeiras, principalmente naquelas que recebem adubações potássicas elevadas, evidenciados principalmente na face do sol poente, que recebe os maiores níveis de irradiância. O objetivo deste trabalho foi verificar os impactos fisiológicos e a escaldadura em mudas de *Coffea arabica* L. cultivadas em solução nutritiva, em função da aplicação de doses crescentes de magnésio (Mg) sob o efeito de dois níveis de irradiância. O experimento foi conduzido em condições controladas, em câmaras de crescimento, no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Foram utilizadas mudas de cafeeiros da cultivar Mundo Novo IAC 379/19. Os tratamentos consistiram na aplicação de cinco doses de Mg (0; 48; 96; 192 e 384 mg L<sup>-1</sup>) e na exposição das mudas à dois níveis de irradiância, (80 e 320 µmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5x2, com 6 repetições sendo uma planta por unidade experimental, totalizando 60 parcelas. Os teores foliares de Mg aumentaram em função das doses de Mg; este comportamento foi dependente da irradiância. Tanto a deficiência quanto o excesso de Mg causou aumento das atividades das enzimas antioxidantes, em função de uma maior produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). Altos níveis de irradiância provocaram fotooxidação e sintomas de escaldadura em folhas de cafeeiros, de forma mais intensa nas plantas deficientes em Mg e naquelas que receberam doses excessivas deste nutriente. O estudo mostrou que há uma relação íntima entre o complexo antioxidante do cafeeiro e o suprimento de Mg em função da irradiância a qual as plantas são submetidas, onde Mg funciona como agente atenuante do estresse oxidativo em condições de estresse causado pelo aumento da irradiância.

**PALAVRAS-CHAVE:** estresse oxidativo, atividade enzimática, escaldadura.

## SUN SCALD IN COFFEE PLANTS SUPPLIED WITH MAGNESIUM

**ABSTRACT:** Magnesium deficiency symptoms have been increasingly frequent in coffee plantations, especially in those receiving high potassium fertilizing, evidenced mainly on the side of the setting sun, which receive the highest levels of irradiance. The objective of this work was to verify the physiological effects and sun scald on *Coffea arabica* L. seedlings cultivated in nutrient solution, in function of the application of increasing doses of Mg under the effect of two levels of irradiance. The experiment was conducted under controlled conditions in growth chambers at the Department of Plant Pathology of the Universidade Federal de Lavras (UFLA). We used coffee seedlings of cultivar Mundo Novo IAC 379/19. The treatments consisted of the application of five doses of Mg (0, 48, 96, 192 and 384 mg L<sup>-1</sup>) and of the exposure of the seedlings to two levels of irradiance (80 and 320 µmol photon m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). The experimental design was in randomized blocks, in a 5x2 factorial arrangement with six replicates and one plant per experimental unit, totalizing 60 plots. The foliar content of Mg increased in function of the doses of Mg; this behavior was dependent of the irradiance. Sun scald symptoms were more evident in the extremes of Mg supplement and appeared only on older leaves. Both magnesium deficiency and excess caused the increase in the activity of antioxidant enzymes, due to a higher production of reactive oxygen species (ROS). High irradiance levels caused photo-oxidation and sun scald symptoms on coffee leaves, more intensely in plants with Mg deficiency and on those that received excessive doses of this nutrient. The study showed that there is a close relation between the antioxidant complex of the coffee plant and the supplement of Mg in function of irradiance to which plants are subjected, on which Mg acts as mitigating agent of oxidative stress under stressful conditions caused by the increase in irradiance.

**KEYWORDS:** oxidative stress, enzymatic activity, sun scald.

## INTRODUÇÃO

O magnésio (Mg) é o quarto nutriente mais exigido pelo cafeeiro, para cada saca de café produzida são necessários 1,9 Kg de MgO (MATIELLO et al., 2010). O Mg tem várias funções-chave nas plantas e muitos processos fisiológicos e

bioquímicos críticos, são adversamente afetados pela sua deficiência, levando a prejuízos no crescimento e na produção (MARSCHNER, 2012).

Estudos recentes mostraram que o Mg possui papel fundamental no transporte de carboidratos, principalmente sacarose, em diversas espécies (CALMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994a; CALMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994b; RIGA, ANZA; 2003; SILVA et al., 2014). Com a redução no transporte de carboidratos e, conseqüentemente no crescimento das raízes, há menor absorção de água e nutrientes, prejudicando assim a produtividade das culturas. Em adição, o acúmulo de carboidratos nas folhas pode estimular a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), tóxicas aos organismos vegetais (MARSCHNER, 2012; MENGEL; KIRKBY, 2001).

As espécies reativas de oxigênio (EROs), como superóxido, peróxido de hidrogênio e radical hidroxila, tem um aumento na sua produção a partir de diferentes estresses sofridos pelas plantas (RESENDE; SALGADO; CHAVES, 2003). A produção desses radicais torna-se prejudicial ao organismo quando há um aumento excessivo na sua produção ou diminuição de agentes antioxidantes, resultando em estresse oxidativo (RESENDE; SALGADO; CHAVES, 2003).

O aumento de EROs é comumente observado sob determinadas condições de estresse, quando o equilíbrio da sua formação e detoxificação não pode ser mantido. A degradação eficiente das EROs requer a ação conjunta de diferentes enzimas do sistema antioxidante enzimático das plantas, principalmente composto pela dismutase do superóxido (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX) (PASTORI; FOYER, 2002; APEL; HIRT, 2004; NEILL et al., 2008). Apesar da presença de um eficiente sistema antioxidante, danos oxidativos ainda ocorrem nas células vegetais, quer devido à produção descontrolada ou remoção ineficiente das EROs.

Com as mudanças climáticas observadas, especialmente na última década e a expansão constante das fronteiras agrícolas um estudo detalhado relacionado à nutrição com Mg na cultura do cafeeiro em função da irradiância se faz necessário.

O objetivo deste trabalho foi verificar os impactos fisiológicos e a escaldadura em mudas de *Coffea arabica* L. cultivadas em solução nutritiva, em função da aplicação de doses crescentes de magnésio (Mg) sob o efeito de dois níveis de irradiância.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido sob condições controladas, em câmaras de crescimento e cultivo em solução nutritiva, no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Os tratamentos consistiram da aplicação de cinco doses de Mg [0; 48 (dose central de da solução de HOAGLAND; ARNON, 1950); 96, 192 e 384 mg L<sup>-1</sup>] e na exposição das mudas à dois níveis de irradiância (80 e 320 µmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), o primeiro simulando condições de baixa intensidade fotossintética, como no interior do dossel das plantas, em cafeeiros sombreados ou em cafeeiros em plantios adensados; o segundo nível (320 µmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) simula condições de produção plena de fotossíntese.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados num arranjo fatorial 5x2, com 6 repetições e uma planta por unidade experimental, totalizando 60 parcelas.

As mudas foram submetidas à solução completa de Hoagland e Arnon (1950), exceto Mg, utilizando-se como fontes de nutrientes: NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O; KNO<sub>3</sub>; KCl; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; MnSO<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O; CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O; H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O e solução de Fe-EDTA. O Mg foi aplicado separadamente a fim de atingirem-se as concentrações propostas em cada tratamento (0; 48; 96, 192 e 384 mg L<sup>-1</sup>), sendo que a fonte utilizada foi o MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O. Foi mantida aeração contínua da solução nutritiva. O pH da solução foi monitorado diariamente, mantido entre 5,0 e 5,5, com a adição de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> ou NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Quando necessário, o volume dos vasos foi completado com água deionizada. A troca da solução foi realizada nos diferentes tratamentos quando a depleção atingia 70% da concentração inicial.

Aos 90 dias após a aplicação dos tratamentos foi coletada uma folha nova, totalmente expandida, por planta, para se fazer as análises fisiológicas. Após coletado o material foi imediatamente congelado em nitrogênio líquido e posteriormente armazenado em ultrafreezer à -80° C. Posteriormente as plantas foram expostas à pleno sol, onde a irradiância atingiu o valor máximo de 1500 µmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

Após 3 dias, à pleno sol, coletou-se mais uma amostra por planta para procederem-se as análises fisiológicas, seguindo o mesmo procedimento das anteriores. Posteriormente o experimento foi colhido. Coletaram-se separadamente folhas, caule e raízes das plantas para análise nutricional. O material vegetal foi lavado em água deionizada, acondicionado em sacos de papel e seco em estufa, a 60°C, até atingirem peso constante. Após secagem, foi realizada a pesagem e a moagem do material seco das folhas, caule e raízes das plantas.

As análises da atividade das enzimas antioxidantes foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Lavras – UFLA. Foram analisadas as atividades da dismutase do superóxido (SOD), da catalase (CAT) e da peroxidase do ascorbato (APX) (BIEMELT; KEETMAN; ALBRECHT, 1998).

Após realizadas as coletas do material vegetal para as análises fisiológicas, com as mudas que permaneceram 3 dias em pleno sol, o experimento foi colhido, coletaram-se, separadamente, folhas, caules e raízes das plantas para análise nutricional.

Os dados foram avaliados mediante análise de variância pelo teste 'F'; quando significativo, realizou-se análise de regressão para as doses de Mg e níveis de irradiância. Fez-se o desdobramento das doses dentro de cada nível de irradiância para as variáveis respostas onde a interação foi significativa. Utilizou-se para as análises o software Sisvar

(FERREIRA, 2011) e para confecção dos gráficos o SigmaPlot 11.0. Os pontos de máximo e mínimo das funções quadráticas foram obtidos pela derivada de primeira ordem, igualando-se a mesma a zero.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento nos teores de Mg tanto nas folhas quanto nas raízes em função das doses aplicadas (Figura 1). Os máximos teores foliares de Mg foram de 8,78 e 6,9 g kg<sup>-1</sup>, obtidos com a aplicação de 285 e 250 mg L<sup>-1</sup> de Mg, nos níveis de irradiância 80 e 320 μmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 1A). Os teores foliares de Mg considerados adequados para mudas de cafeeiros variam de 1,1 a 1,2 g Kg<sup>-1</sup> (GONÇALVES et al., 2009). Os teores de observados Mg na testemunha foram próximos a 2,5 g kg<sup>-1</sup>, acima do nível crítico estabelecido para mudas.

Os teores de Mg variaram entre 5,2 e 5,5 g kg<sup>-1</sup> com a aplicação da dose central da solução de Hoagland & Arnon (1950) (48 mg L<sup>-1</sup>). Estes valores encontram-se acima da faixa considerada adequada para mudas de cafeeiros (1,1 – 1,2 g kg<sup>-1</sup> - GONÇALVES et al., 2009). Entretanto, a maior produção de massa seca foi alcançada na dose de 240 mg L<sup>-1</sup>, os teores foliares de Mg equivalentes a esta dose foram de 8,64 e 6,9 g kg<sup>-1</sup>, nos níveis de irradiância 80 e 320 μmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente. Estes teores estão próximos dos encontrados por Clemente et al. (2008), que estabeleceram os valores de 8,26 a 8,97 g kg<sup>-1</sup> como faixa crítica para o cafeeiro após o primeiro ano de plantio.

As reduções nos teores foliares de Mg a partir da dose 285 e 250 mg L<sup>-1</sup> nos níveis de irradiância 80 e 320 μmol fóton m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente, estão relacionadas ao desequilíbrio causado pelo excesso deste nutriente na solução. Um dos fatores possíveis foi a redução nos teores foliares de K abaixo do nível crítico. O substrato para ATPases é o Mg-ATP, portanto a máxima atividade de ATPases necessita da presença do K. A síntese da ATP pelo processo da fosforilação (ADP+Pi= ATP) tem essencial requerimento de Mg para ligação entre o ADP e a enzima. Isto explica a alta concentração de Mg nos cloroplastos e nas mitocôndrias, onde ocorrem as reações de síntese de ATP pela fotofosforilação e fosforilação oxidativa (FAQUIN, 2005).

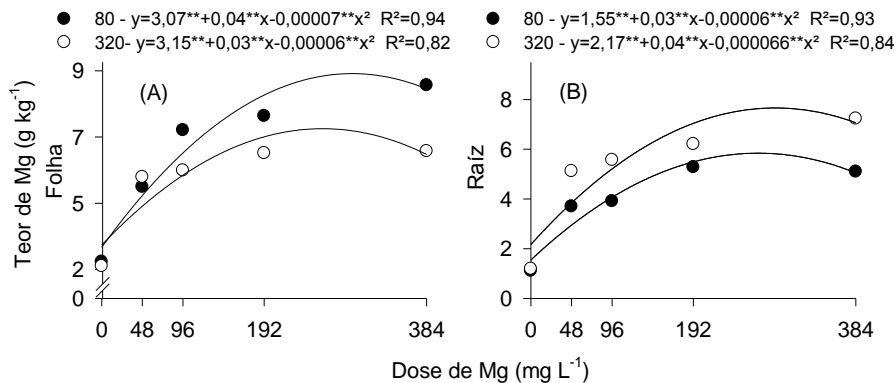


Figura 1 Teores de Mg em folhas (A) e raízes (B) de mudas de cafeeiros em função da aplicação de diferentes doses de Mg em dois níveis de irradiância. Significativo, pelo teste de t, a 5% (\*) e 1% (\*\*)

O aumento das concentrações de Mg na solução reduziu as atividades das enzimas do sistema antioxidante da planta (SOD, CAT e APX). O comportamento foi quadrático decrescente para as três enzimas estudadas (Figuras 2 e 3).

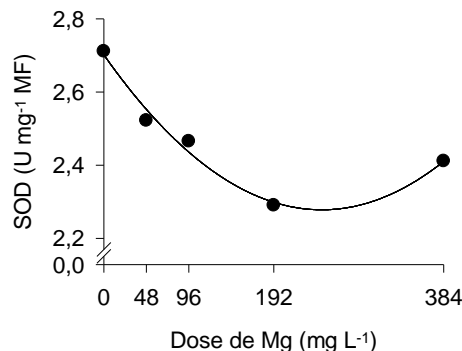


Figura 2 Atividade da enzima dismutase do superóxido (SOD) em função da aplicação de diferentes doses de Mg. Significativo, pelo teste de t, a 5% (\*) e 1% (\*\*)

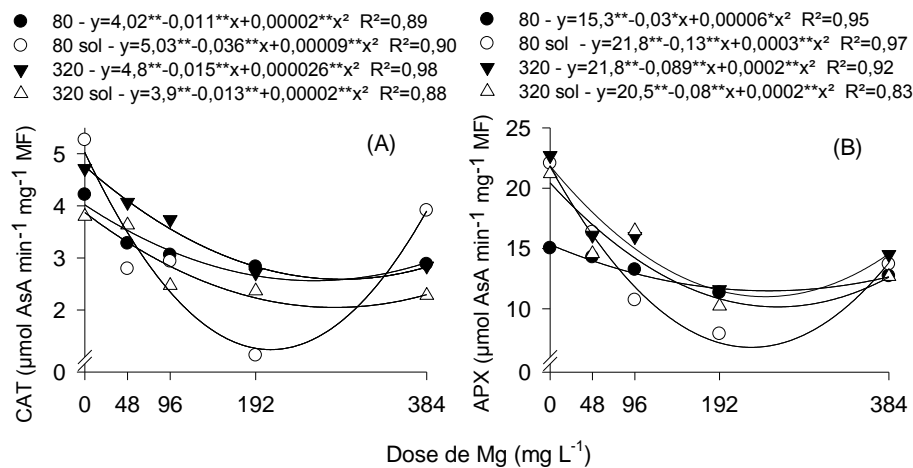


Figura 3 Atividade das enzimas catalase (CAT) (A) e peroxidase do ascorbato (APX) (B) em mudas de café em função da aplicação de diferentes doses de Mg e diferentes níveis de irradiância, em amostras coletadas dentro da câmara de crescimento e fora da câmara de crescimento, após exposição a pleno sol (sol) Significativo, pelo teste de t, a 5% (\*) e 1% (\*\*)

A SOD é responsável pela dismutação do  $O_2^-$  para formar  $H_2O_2$  e  $O_2$ , sendo considerada a primeira linha de defesa contra as EROs. A CAT e a APX são enzimas que catalisam a conversão do  $H_2O_2$  à água e  $O_2$  (IGAMBERDIEV; LEA, 2002).

Para a atividade da SOD a interação entre as doses de Mg e a irradiância não foi significativa, o comportamento da atividade desta enzima em função das doses foi quadrático decrescente (Figura 2). O aumento das doses de Mg até  $245 \text{ mg L}^{-1}$  causou redução na atividade da SOD, a partir desse ponto houve um aumento na atividade desta enzima.

Aumentos na atividade do sistema antioxidante em função da deficiência de Mg foram observados nas culturas da amoreira (TEWARI; KUMAR; SHARMA, 2006), *Mentha sp.* (CANDAN; TARHAN, 2003), arroz (CHOU et al., 2011), Feijão (CAKMAK; MARSCHNER, 1992) e café (SILVA et al., 2014).

Silva et al. (2014), observaram maiores atividades das enzimas SOD, CAT e APX em mudas de café deficientes em Mg quando comparadas àquelas com suprimento adequado deste nutriente.

A atuação das enzimas do complexo antioxidante da planta, antes do aparecimento do sintoma visual da deficiência de Mg, retarda os danos fotooxidativos causados pelas EROs e a inativação de enzimas fotossintéticas, fazendo com que a atividade fotossintética seja reduzida somente nas fases mais avançadas da deficiência (KAISER, 1976).

A interação entre as doses de Mg e os níveis de irradiância foi significativa para as atividades da APX e da CAT. O comportamento das atividades dessas enzimas em função das doses de Mg foi quadrático decrescente dentro de cada nível de irradiância, tanto nas amostragens dentro da câmara de crescimento quanto nas amostragens à pleno sol (Figura 3). A interação significativa indica que o comportamento das atividades dessas enzimas em função das doses de Mg depende da irradiância.

As atividades da CAT e da APX foram maiores nas doses mais baixas de Mg. De acordo com Cakmak e Marschner (1992) elevados níveis de componentes do metabolismo antioxidante constituem em uma resposta fisiológica das plantas aos efeitos da deficiência de Mg.

De acordo com Silva et al. (2014), é provável que a ativação do metabolismo antioxidante, em condições de deficiência de Mg, ocorra nos cloroplastos, pois é onde há a redução do  $O_2^-$  e do  $H_2O_2$ , como resultado do restrito consumo de potencial redutor na fixação de  $CO_2^-$ .

Assim como a deficiência, o excesso de Mg também causou aumento das atividades das enzimas do sistema antioxidante (Figuras 2 e 3). Este fato provavelmente ocorreu em função das desordens fisiológicas causadas pelo excesso deste nutriente em si, pela redução na absorção de outros nutrientes, principalmente de K e pelo aumento na concentração salina da solução.

Diversos estudos têm demonstrado o papel dos mecanismos antioxidantes enzimáticos na proteção contra o estresse oxidativo induzido pela salinidade (BANDEOGLU et al., 2004; BEN AMOR et al., 2005; RUBIO et al., 2009). Em arroz (LIN; KAO, 2001), tomate (MITTOVA et al., 2004), milho (AZEVEDO-NETO et al., 2006) e feijão caupi (CAVALCANTI et al., 2007). O aumento da atividade de enzimas, como a SOD, a APX e a CAT, está associado com a manutenção dos níveis de peroxidação de lipídios sob estresse salino.

De acordo com Cakmak (2005), a deficiência de K pode aumentar a produção de EROs, sobretudo em condições de estresse ambiental, como a seca, alta intensidade de luz, calor e limitações nutricionais. De acordo com o autor, a melhoria da nutrição potássica pode reduzir consideravelmente a produção de EROs pela redução da atividade da NADPH oxidase e pela manutenção do transporte de elétrons. A deficiência de K provoca redução na fixação

fotossintética de CO<sub>2</sub> e prejuízos no transporte e utilização de fotoassimilados. Tais distúrbios podem resultar em excesso de elétrons, estimulando assim a produção de EROs (MARSCHNER, 2012; MENGEL; KIRKBY, 2001).

É importante destacar que mesmo na testemunha, as mudas de cafeeiro não apresentaram sintomas visuais de deficiência enquanto permaneceram na câmara de crescimento. Após colocadas por três dias a pleno sol, os sintomas visuais típicos da deficiência apareceram, juntamente com sintomas de escaldadura, que apareceram de forma mais intensa na testemunha e na maior dose de Mg, em função da restrição na absorção de K.

Observa-se na figura 4 que a parte da folha mais velha que foi sombreada pela folha mais nova permaneceu verde, enquanto a parte que foi exposta a irradiância plena apresentou sintomas de escaldadura. Nota-se ainda que a folha mais nova que foi totalmente exposta a irradiância plena, mesmo apresentando menor proteção física, permaneceu verde. Isso ocorreu pois a escaldadura não se trata de um processo puramente físico, e provavelmente o Mg e o K, que são móveis na planta, possuem papel importante na proteção das folhas contra a escaldadura. Relata-se que até 35% do total de Mg em plantas se encontra nos cloroplastos (CAKMAK; YAZICI, 2010).



Figura 4 Muda de cafeeiro cultivada em solução nutritiva sem fornecimento de Mg e exposta por 3 dias a irradiância plena. Observando-se ausência de escaldadura na folha nova e na parte sombreada da folha velha.

No entanto, o aparecimento de sintomas visíveis de deficiência de Mg é altamente dependente da intensidade da luminosa. Segundo Cakmak e Kirkby (2008), em altos valores de intensidade da luz aumenta-se o desenvolvimento de clorose, em conjunto com algumas manchas avermelhadas sobre a lâmina de folha. Segundo esses autores, as partes das folhas que não receberam a luminosidade total não apresentaram sintomas de deficiência de Mg, enquanto as partes das mesmas folhas que receberam luminosidade total apresentaram sintomas típicos da deficiência. De acordo com os autores, plantas em condições de alta intensidade de luz parecem ter maior exigência em Mg comparadas às plantas cultivadas sob baixa intensidade luminosa.

## CONCLUSÕES

- 1- A deficiência ou excesso de Mg proporcionou aumentos nas atividades das enzimas antioxidantes, em função de uma maior produção de ERO's.
- 2- Altos níveis de irradiância provocam fotooxidação e sintomas de escaldadura em folhas de cafeeiros, de forma mais intensa nas plantas com menor suprimento de Mg e K.
- 3- O estudo mostrou que há uma relação íntima entre o complexo antioxidante do cafeeiro e o suprimento de Mg em função da irradiância a qual as plantas são submetidas, onde Mg funciona como agente atenuante do estresse oxidativo em condições de estresse causado pelo aumento da irradiância.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, n. 1, p. 373-399, Jan. 2004.
- AZEVEDO-NETO, A. D. D. et al. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 56, n. 1, p. 87-94, Jan. 2006.
- BANDEOGLU, E. et al. Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl-salinity stress. **Plant Growth Regulation**, New York, v. 42, n. 1, p. 69-77, Jan. 2004.

- BEN AMOR, N. et al. Physiological and antioxidant responses of the perennial halophyte *Crithmum maritimum* to salinity. **Plant Science**, Limerick, v. 168, n. 4, p. 889-899, Apr. 2005.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, Washington, v. 116, n. 2, p. 651-658, Feb. 1998.
- CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Oxford, v. 168, n. 4, p. 521-530, Aug. 2005.
- CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, n. 4, p. 692-704, Aug. 2008.
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Expert Botany**, London, v. 45, n. 9, p. 1251-1257, Sept. 1994a.
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 45, n. 9, p. 1245-1250, Sept. 1994b.
- CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. **Plant Physiology**, Washington, v. 98, n. 6, p. 1222-1227, Oct. 1992.
- CAKMAK, I.; YAZICI, A.M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v. 94, n.2, p. 23-25, 2010.
- CANDAN, N.; TARHAN, L. Relationship among chlorophyllcarotenoid content, antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels by Mg<sup>2+</sup> deficiency in the *Mentha pulegium* leaves. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 41, n. 1, p. 35-40, Jan. 2003.
- CAVALCANTI, F. R. et al. Roots and leaves display contrasting oxidative response during salt stress and recovery in cowpea. **Journal of Plant Physiology**, New York, v. 164, n. 5, p. 591-600, May 2007.
- CHOU, T. S. et al. Effect of magnesium deficiency on antioxidant status and cadmium toxicity in rice seedlings. **Journal of Plant Physiology**, New York, v. 168, n. 10, p. 1021-1030, July 2011.
- CLEMENTE, F. M. V. T. et al. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes no cafeeiro em pós-plantio: primeiro ano. **Coffee Science**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 47- 57, jan./jun. 2008.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. 2005. 100 p. Monografia (Especialização Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.
- GONÇALVES, M. S. **Faixas críticas de teores foliares de nutrientes em mudas de cafeeiro (Coffea arabica L.) produzidas em tubetes**. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- HOAGLAND, D.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. Berkeley: Califórnia Agricultural Experiment Station, 1950.
- IGAMBERDIEV, A. U.; LEA, P. J. The role of peroxisomes in the integration of metabolism and evolutionary diversity of photosynthetic organism. **Phytochemistry**, Oxford, v. 60, n. 7, p. 651-674, Aug. 2002.
- KAISER, M. W. The effect of hydrogen peroxide on CO<sub>2</sub> fixation of isolated chloroplast. **Biochimica Biophysica Acta**, Amsterdam, v. 440, n. 3, p. 476-482, Sept. 1976.
- LIN, C. C.; KAO, C. H. Cell wall peroxidase activity, hydrogen peroxide level and NaCl-inhibited root growth of rice seedlings. **Plant and Soil**, The Hague, v. 230, n. 1, p. 135-143, Mar. 2001.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil**: manual de recomendações. Rio de Janeiro: Mapa, 2010.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5<sup>th</sup> ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- MITTOVA, V. et al. Salinity up-regulates the antioxidative system in root mitochondria and peroxisomes of the wild salt-tolerant tomato species *Lycopersicon pennellii*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 399, p. 1105-1113, Mar. 2004.
- NEILL, S. et al. Nitric oxide, stomatal closure, and abiotic stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 59, n. 2, p. 165-176, Apr. 2008.
- PASTORI, G. M.; FOYER, C. H. Common components, networks, and pathways of cross-tolerance to stress. The central role of "redox" and abscisic acid-mediated controls. **Plant Physiology**, Washington, v. 129, n. 2, p. 460-468, June 2002.
- RESENDE, M. L. V.; SALGADO, S. M. L.; CHAVES, Z. M. Espécies ativas de oxigênio na resposta de defesa de plantas a patógenos. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 2, p. 123-130, mar./abr. 2003.
- RIGA, P.; ANZA, M. Effect of magnesium deficiency on pepper growth parameters: implications for the determination of Mg critical value. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 8, p. 1581-1593, Aug. 2003.
- RUBIO, M. C. et al. Effects of salt stress on the expression of antioxidant genes and proteins in the model legume *Lotus japonicus*. **New Phytologist**, Cambridge, v. 181, n. 4, p. 851-859, Mar. 2009.

SILVA, D. M. et al. Physiological and biochemical impacts of magnesium-deficiency in two cultivars of coffee. **Plant and Soil**, The Hague, v. 328, n. 2, p. 133-150, Sept. 2014.

TEWARI, R. K.; KUMAR, P.; SHARMA, P. N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidante responses in mulberryplants. **Science Horticulture**, London, v. 108, n. 1, p. 7-14, Mar. 2006.