

CONCENTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES E CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) EFICIENTES NO USO DE ZINCO

MICRONUTRIENTS CONTENT AND BIOCHEMISTRY CHARACTERISTICS OF ZINC EFFICIENTS COFFEE (*Coffea arabica* L.) PLANTS

André Vinícius ZABINI¹; Herminia Emilia Prieto MARTINEZ²; Fernando Luiz FINGER²;
Camila Andrade SILVA¹

1. Pós-graduando, Departamento de Fitotecnia, UFV, Viçosa, MG. zabini@hotmail.com ; 2. Professor Adjunto, Departamento de Fitotecnia - UFV. herminia@ufv.br ;

RESUMO: O zinco participa ativamente no metabolismo vegetal como constituinte e ativador de várias enzimas, e cultivares da mesma espécie podem diferir para as características fisiológicas dependentes de zinco. Com o objetivo de caracterizar quatro progênies de cafeeiros divergentes na eficiência nutricional para zinco, na fase de muda, foi realizado um experimento fatorial 4 x 2 (4 progênies de cafeeiros e duas concentrações de zinco) no delineamento inteiramente ao acaso com quatro repetições. As mudas dos cafeeiros foram cultivadas por 10 meses em casa de vegetação, em solução nutritiva com e sem zinco. Avaliou-se a concentração de zinco, ferro, cobre e manganês, os teores de pigmentos e de compostos indólicos nas folhas dos cafeeiros. As progênies de cafeeiros diferiram na absorção de micronutrientes e na concentração de pigmentos e compostos indólicos. A eficiência nutricional para zinco em mudas de cafeeiros não depende de altas concentrações foliares de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência nutricional. Micronutrientes. Clorofilas. Compostos indólicos.

INTRODUÇÃO

Genótipos tolerantes à deficiência de zinco desenvolvem-se melhor que os genótipos sensíveis, mas os mecanismos fisiológicos responsáveis pela tolerância diferencial não são completamente entendidos até o presente (RENGEL, RÖMHELD ; MARSCHNER, 1998). Estes mecanismos podem envolver a maior capacidade de absorção, translocação ou utilização de zinco nas células, bem como estarem relacionados às características bioquímicas e fisiológicas dependentes de zinco. Deve-se considerar, no entanto, não apenas o efeito do zinco, mas as possíveis interações entre zinco e outros micronutrientes catiônicos.

A interação de zinco com outros nutrientes foi relatada por diversos autores (FAGERIA, 2001, KAYA, BURTON; HIGGS, 2001, KAYA; HIGGS, 2001, MARSCHNER, 1995, MISRA ; RAMANI, 1991). O excesso de zinco provoca inibição da fotossíntese pela diminuição da atividade da RuBP carboxilase/oxigenase (Rubisco), causada, provavelmente, pela competição de zinco com magnésio no sítio de ativação da Rubisco. A redução da atividade do fotossistema II (PS II) pode ser devida ao deslocamento de manganês pelo excesso de zinco, na membrana do tilacóide. Segundo estes mesmos autores, o excesso de zinco afeta a absorção e a translocação de ferro pela inibição competitiva entre os cátions,

possivelmente pela semelhança de raio iônico entre eles. Plântulas de noqueira (*Carya illinoensis*) da variedade Stuart incrementaram os teores foliares de ferro, enquanto na variedade Curtis houve incremento no teor de manganês, em resposta à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva (KIM, MILLS; WETZSTEIN, 2002).

A deficiência de zinco pode comprometer importantes eventos fisiológicos vegetais e, conseqüentemente o crescimento e o desenvolvimento da planta. Kaya e Higgs (2001) verificaram que plantas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) deficientes em zinco apresentaram redução nos teores de clorofila, incremento na permeabilidade de membrana e redução na produção de matéria seca em relação às plantas-controle. Segundo Marschner (1995), sob deficiência de zinco a redução na atividade da enzima Cu/Zn superóxido dismutase (Cu/ZnSOD) favorece o incremento dos danos oxidativos, ocasionando a diminuição no teor de clorofila e na atividade fotossintética, sendo a intensidade dos danos proporcional a intensidade luminosa.

Alternativamente aos métodos tradicionais, uma medida indireta, rápida e precisa dos teores foliares de clorofila pode ser obtida com o emprego de aparelhos portáteis, a exemplo do SPAD 502 Minolta Corp. Yamamoto et al. (2002) verificaram elevada correlação entre o índice SPAD e os teores

foliares de clorofila em sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.).

Sintomas de deficiência de zinco são precedidos pela alteração das funções fisiológicas (YU ; RENGEL, 1999), podendo resultar em diminuição na produção de matéria seca independentemente da manifestação de sintomas visuais de deficiência. O zinco é constituinte de diversas enzimas, entre elas a sintase do triptofano (Trp-sintase), a qual é responsável pela produção de triptofano a partir de compostos indólicos e serina. O triptofano, por sua vez, é precursor do ácido indol acético (IAA), principal hormônio de crescimento vegetal (MALAVOLTA, 1980). Segundo Marschner (1995), os baixos níveis de IAA observados em plantas deficientes em zinco resultam da inibição da síntese ou aumento da degradação do IAA, porém, pode ocorrer incremento no teor de IAA sob deficiência de zinco devido a inibição da síntese de proteínas e, conseqüentemente, acúmulo de triptofano e outros aminoácidos.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar quatro progênies de cafeeiros divergentes na eficiência nutricional para zinco, na fase de muda, avaliando o efeito do suprimento de zinco nas concentrações dos micronutrientes zinco, ferro, cobre e manganês e nos teores de pigmentos e compostos indólicos nas folhas dos cafeeiros.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em solução nutritiva de Clark modificada (MARTINEZ, 2002), por 10 meses, no período de outubro de 2003 a julho de 2004. As soluções-estoque de macronutrientes e a solução de cloreto férrico foram purificadas segundo Fontes (1986). As progênies de *Coffea arabica* L. avaliadas neste trabalho foram selecionadas previamente quanto à exigência e eficiência nutricional de zinco segundo ZABINI (2004), sendo as progênies UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco), UFV 4066-3 (exigente e eficiente em alto suprimento de zinco), Caturra Vermelho 4 (intermediária quanto à exigência e eficiência nutricional para zinco) e IAC 4376-5 (Tupi) (pouco exigente e pouco eficiente nutricionalmente para zinco). As sementes dessas quatro progênies foram germinadas em areia lavada, irrigadas com solução nutritiva a ¼ de força sem zinco e transplantadas no estádio de folhas cotiledonares para bandejas contendo a mesma solução, sem zinco, onde permaneceram durante 15 dias para adaptação. Após este período, as mudas

foram transferidas para as bandejas definitivas, as quais receberam solução modificada para obtenção das concentrações de 0,0 e 3,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. O experimento constituiu-se de um fatorial 4 x 2 (quatro progênies e duas concentrações de zinco), no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições e parcelas constituídas de uma planta por progênie. A solução foi mantida sob aeração constante, o pH ajustado semanalmente a $5,0 \pm 0,5$ e a troca ou reposição da solução nutritiva realizada mediante o critério de 30% de depleção do valor inicial da condutividade elétrica. Foram necessárias quatro trocas e quatro reposições de solução durante o experimento, sendo que na quarta troca, a concentração de zinco nos tratamentos que receberam o elemento foi aumentada para 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco.

Ao final do ensaio foram coletados quatro discos foliares da região central do limbo, com 15 mm de diâmetro cada (aproximadamente 0,0755 g de matéria fresca cada), do segundo par de folhas em ramos plagiotrópicos, para as análises de teores de pigmentos (clorofila *a*, clorofila *b*, clorofilas totais, xantofilas + carotenos) e compostos indólicos. Os discos foliares foram acondicionados em papel alumínio, congelados em nitrogênio líquido imediatamente após a coleta, e armazenados em freezer a -80°C até o momento da análise. A medida indireta do teor de clorofila (índice SPAD) no segundo par de folhas foi determinada com o clorofilômetro portátil SPAD-502 {Soil-Plant Analysis Development (SPAD) Section Minolta Camera CO. ETD, Japan}.

O teor de compostos indólicos foi determinado pela reação com ninidrina (SACRAMENTO, 1998) e os teores de pigmentos segundo Lichthenthaler (1987). A concentração total de zinco, ferro, cobre e manganês foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica no extrato da digestão nítrico-perclórica em raízes, ramos, folhas apicais (1^o e 2^o pares de folhas), folhas inferiores (seis pares de folhas inferiores) e folhas maduras (restante).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F, a 5% de probabilidade, fazendo-se o desdobramento das interações, independentemente da significância, e as respectivas médias comparadas pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As progênies dos cafeeiros não diferiram entre si para a concentração de zinco na folha madura e na raiz, quando foi omitido zinco na

solução nutritiva. Nesta mesma condição, não foi constatado efeito significativo entre progênies para a concentração de ferro na folha inferior, de cobre na folha apical e de manganês no caule. Na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, as progênies dos cafeeiros diferiram quanto à concentração de zinco em todas as partes analisadas; entretanto, para os demais micronutrientes diferiram apenas quanto ao teor de ferro na raiz, de cobre na folha inferior, no caule e na raiz e de manganês na folha inferior e na raiz (Quadro 1). Entre os micronutrientes, o ferro apresentou a maior concentração, com média de $309,00 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha inferior das plantas que não receberam zinco em solução, enquanto o menor teor foi verificado para o cobre, com média de $1,57 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha madura, na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco.

O teor de zinco foi reduzido em todas as partes da planta sob restrição no fornecimento do nutriente, constatando-se as maiores médias de concentração de zinco na raiz na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ e as menores médias para o teor de zinco na folha inferior, na solução sem zinco. Na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução, houve redução no teor de ferro na folha apical e na folha madura das progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi), de cobre na folha madura da progênie Caturra Vermelho 4 e no caule da progênie IAC 4376-5 (Tupi), e de manganês na folha apical da progênie Caturra Vermelho 4, não sendo verificadas reduções nos teores destes micronutrientes nas progênies UFV 4066-5 e UFV 4066-3 (Quadro 1). Estes resultados se devem às interações que ocorrem entre os micronutrientes catiônicos, sendo que a redução nos teores de um ou mais micronutrientes em detrimento da absorção em excesso de outro foi constatada em diversas culturas (FAGERIA, 2001, KIM, MILLS ; WETZSTEIN, 2002, MARSCHNER, 1995, QADAR, 2002, YU ; RENGEL, 1999).

A absorção de micronutrientes catiônicos por dicotiledôneas e monocotiledôneas, exceto as gramíneas (estratégia I), envolve a atuação de redutases responsáveis pela redução de Fe (III) a Fe (II), H^+ -ATPases que atuam na acidificação da rizosfera e, complementando o processo, canais protéicos específicos no transporte dos íons através da membrana plasmática. Estes canais, embora apresentem certa especificidade, parecem atuar na absorção de micronutrientes catiônicos em geral e, deste modo, o desbalanço no fornecimento de micronutrientes pode acarretar a absorção em excesso do elemento presente em maior quantidade em detrimento da absorção dos demais (GRUSAK, PEARSON ; MARENTES, 1999, WELCH, 1995).

Segundo Marschner (1995), este fato é ainda mais evidente no caso de zinco e ferro, que apresentam raio iônico semelhante. Misra e Ramani (1991) verificaram redução crescente na absorção e no transporte de ferro em plantas de *Mentha arvensis* L., cultivadas em concentrações variando de 0,0 a 0,80 mM de ZnCl_2 em solução nutritiva, sugerindo que este comportamento se deve à semelhança entre os raios iônicos de zinco e ferro e ao possível efeito regulatório do zinco sobre a absorção de ferro. Embora neste experimento as mudas dos cafeeiros não tenham evidenciado sintomas visuais de toxidez de zinco, é provável que a dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco tenha contribuído para a redução no teor foliar de ferro na folha apical e na folha madura das progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi).

Na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, a progênie UFV 4066-5 apresentou baixa concentração de zinco na folha apical, na folha madura e no caule, a menor concentração de ferro na folha apical ($73,39 \text{ mg kg}^{-1}$) e na folha madura ($111,36 \text{ mg kg}^{-1}$) e também o menor teor de cobre e de manganês na folha madura ($0,75$ e $88,54 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente). Entretanto, a UFV 4066-5 apresentou altos teores de zinco, ferro, cobre e manganês na raiz. Por sua vez, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou os maiores teores de zinco, ferro e manganês na folha apical ($9,34$, $129,15$ e $120,81 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) e na folha madura ($7,15$, $168,95$ e $145,60 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente), e cobre na folha madura ($2,45 \text{ mg kg}^{-1}$), e baixos teores de zinco, ferro, cobre e manganês na raiz (Quadro 1).

A progênie Caturra Vermelho 4 manteve a concentração de zinco em patamares mais elevados na folha apical e na folha madura quando se omitiu o elemento na solução nutritiva. Percebe-se ainda que a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou aumento na concentração de ferro, principalmente nas folhas apicais e folhas maduras, acompanhadas por reduções nos teores de ferro na raiz, enquanto a UFV 4066-5, pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco, não alterou a concentração de ferro sob omissão de zinco. A concentração de cobre foi incrementada em folhas maduras na progênie Caturra Vermelho 4, e reduzida em folhas apicais e inferiores na progênie UFV 4066-5 na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$. Percebe-se que a omissão de zinco resultou em concentrações limitantes de cobre, sendo essa limitação menos evidente na progênie Caturra Vermelho 4.

Quadro 1. Médias da concentração de zinco, ferro, cobre e manganês em diferentes partes da planta de quatro progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

Progênies	Zinco (mg kg-1)*																													
	Folha apical				Folha inferior				Folha completa/expandida				Caule				Raiz													
	6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1											
UFV 4066-5	10,30	a	B	5,86	b	B	12,36	a	B	8,43	b	B	10,51	a	B	6,58	b	A	26,78	a	B	3,76	b	B	69,15	a	C	9,40	b	A
UFV 4066-3	9,38	a	B	6,94	b	B	17,88	a	A	11,31	b	A	11,43	a	A	6,95	b	A	22,46	a	C	7,28	b	A	161,18	a	A	8,35	b	A
Caturra Ver.4	14,26	a	A	9,34	b	A	9,86	a	C	6,89	b	C	11,50	a	A	7,15	b	A	25,49	a	B	7,30	b	A	90,39	a	B	7,44	b	A
IAC 4376-5	13,75	a	A	9,15	b	A	12,78	a	B	8,04	b	BC	10,60	a	B	6,71	b	A	56,54	a	A	6,98	b	A	45,63	a	D	8,84	b	A
CV (%)	7,37				8,15				5,85				6,86				4,56													
Progênies	Ferro (mg kg-1)*																													
	Folha apical				Folha inferior				Folha completa/expandida				Caule				Raiz													
	6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1											
UFV 4066-5	111,58	a	A	73,39	a	B	241,66	a	A	259,61	a	A	106,79	a	A	111,36	a	C	55,36	a	A	47,04	a	B	202,94	a	B	217,29	a	AB
UFV 4066-3	80,13	a	A	97,95	a	AB	307,90	a	A	344,00	a	A	115,94	a	A	128,89	a	BC	44,85	a	A	47,98	a	B	307,24	a	A	261,80	a	A
Caturra Ver. 4	75,46	b	A	129,15	a	A	236,14	b	A	340,24	a	A	103,83	b	A	168,95	a	A	42,39	a	A	59,51	a	AB	204,61	a	B	123,74	b	C
IAC 4376-5	79,48	b	A	119,93	a	A	300,43	a	A	292,15	a	A	94,95	b	A	143,41	a	AB	47,20	b	A	75,73	a	A	247,59	a	B	161,80	b	BC
CV (%)	28,58				19,00				15,23				30,34				17,45													
Progênies	Cobre (mg kg-1)*																													
	Folha apical				Folha inferior				Folha completa/expandida				Caule				Raiz													
	6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1											
UFV 4066-5	4,39	a	A	2,76	b	A	3,93	a	A	2,45	b	AB	1,38	a	A	0,75	a	C	5,08	a	A	3,30	b	C	17,55	a	B	21,23	a	AB
UFV 4066-3	4,59	a	A	3,70	a	A	3,61	a	A	3,26	a	A	1,49	a	A	1,31	a	BC	4,64	a	A	4,51	a	B	32,70	a	A	23,38	b	A
Caturra Ver. 4	3,44	a	A	3,53	a	A	1,48	a	B	1,69	a	B	1,56	b	A	2,45	a	A	3,66	a	B	3,79	a	BC	19,16	a	B	16,63	a	B
IAC 4376-5	3,35	a	A	3,78	a	A	1,86	a	B	1,81	a	B	2,19	a	A	1,78	a	AB	5,05	b	A	6,05	a	A	20,24	a	B	19,75	a	AB
CV (%)	23,85				23,02				34,31				12,37				14,40													
Progênies	Manganês (mg kg-1)*																													
	Folha apical				Folha inferior				Folha completa/expandida				Caule				Raiz													
	6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1		6,0 □mol L-1		0,0 □mol L-1											
UFV 4066-5	96,25	a	A	86,78	a	AB	276,26	a	A	257,31	a	A	132,63	a	A	88,54	b	B	34,24	a	A	30,99	a	A	77,54	a	B	106,95	a	A
UFV 4066-3	62,91	a	A	70,05	a	B	273,71	a	A	290,80	a	A	114,45	a	A	98,94	a	B	42,98	a	A	39,38	a	A	60,49	a	B	58,48	a	AB
Caturra Ver. 4	86,96	b	A	120,81	a	A	247,61	a	AB	272,74	a	A	130,23	a	A	145,60	a	A	31,53	a	A	39,63	a	A	68,64	a	B	44,43	a	B
IAC 4376-5	62,63	a	A	89,93	a	AB	211,39	a	B	187,43	a	B	114,00	a	A	101,36	a	AB	35,45	a	A	45,30	a	A	193,60	a	A	85,96	b	AB
CV (%)	26,13				12,72				24,62				26,92				36,77													

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

A concentração de manganês foi incrementada nas folhas apicais da progênie Caturra Vermelho 4 e reduzida nas folhas maduras da progênie UFV 4066-5 sob omissão de zinco. Quando o zinco foi fornecido em solução na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ não foram constatadas diferenças tão expressivas entre as progênies.

Neste sentido, pressupõe-se que a eficiência nutricional para zinco não esteja relacionada, necessariamente, à manutenção de zinco, ferro, cobre e manganês em concentrações mais elevadas nas folhas dos cafeeiros, mas a diversos fatores fisiológicos responsáveis pela melhor utilização de zinco e dos outros micronutrientes catiônicos. Segundo Zabini (2004), a progênie UFV 4066-5 demonstrou baixa produção de matéria seca de raízes, resultando em baixa eficiência de absorção, porém, baixo conteúdo de zinco total, aliado à elevada produção de biomassa da parte aérea e alta eficiência de produção de biomassa e, conseqüentemente, elevada eficiência nutricional. Estes resultados podem indicar que a elevada eficiência nutricional para zinco observada para a progênie UFV 4066-5 se estenda aos demais micronutrientes catiônicos.

O fornecimento de zinco na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ não reduziu o teor radicular de ferro, de cobre e de manganês em nenhuma das progênies avaliadas, indicando que a redução no teor foliar destes micronutrientes pode ser resultante da complexação na raiz ou, mais provavelmente, da inibição no transporte para a parte aérea. Observa-se que na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco houve redução no teor radicular de ferro nas progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi), de cobre na progênie UFV 4066-5 e de manganês na progênie IAC 4376-5 (Tupi), sugerindo que o zinco desempenha alguma função regulatória na absorção radicular de ferro, cobre e manganês.

Nos Quadros 2 a 4 encontram-se os resultados das análises foliares de pigmentos,

índice SPAD e compostos indólicos. A progênie UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco) apresentou as menores médias para os teores de clorofila *a* (*Ca*), clorofila *b* (*Cb*), clorofila total (*Ca+b*) e xantofilas + carotenos (*X+C*), apesar de diferir da progênie IAC 4376-5 (Tupi) apenas para *Ca*. Nota-se para a progênie Caturra Vermelho 4 os maiores teores médios de *Ca*, *Cb*, *Ca+b* e *X+C* na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Os teores de pigmentos (*Ca*, *Cb*, *Ca+b* e *X+C*) foram reduzidos percentualmente sob restrição no fornecimento de zinco nas progênies UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco), UFV 4066-3 e IAC 4376-5 (Tupi), sem diferença estatística entre elas, e incrementados significativamente na Caturra Vermelho 4 (Quadros 2 e 3).

Pestana et al. (2001) verificaram que mudas de laranja (*Citrus sinensis* L. cv. Newhall) cultivadas em solução nutritiva apresentaram redução nos teores de clorofila e na atividade fotossintética nas doses $0,0$ e $5,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de ferro, porém, os teores foliares de ferro, em média $177,00 \text{ mg kg}^{-1}$, não diferiram significativamente entre os tratamentos $0,0$ a $20,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de ferro, sugerindo a ocorrência de inativação fisiológica do elemento. Segundo Fageria (2001), zinco e manganês interferem na utilização de ferro para a síntese de clorofila. Marschner (1995) afirma que a redução no teor de clorofila pode ocorrer pelo incremento nos danos oxidativos, os quais se devem à redução na atividade da Cu/ZnSOD sob deficiência de zinco. A redução da fotossíntese pode também ser devida ao excesso de zinco, levando à diminuição da atividade da RuBP carboxilase/oxigenase (Rubisco) pela competição entre zinco e magnésio no sítio ativo da Rubisco, onde o magnésio é essencial como ativador enzimático. O excesso de zinco pode ainda deslocar manganês na membrana do tilacóide e afetar a atividade do fotossistema II.

Quadro 2. Médias das concentrações (mg L^{-1}) de clorofila *a* (*Ca*), de clorofila *b* (*Cb*) e clorofila total (*Ca+b*) de quatro progênies de cafeeiro em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

Progênies	<i>Ca</i>		<i>Cb</i>		<i>C(a+b)</i>	
	$6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$	$0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$	$6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$	$0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$	$6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$	$0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$
UFV 4066-5	4,831 a C	3,942 b D	2,490 a C	2,219 a C	7,321 a C	6,161 b C
UFV 4066-3	6,108 a A	5,307 b B	3,017 a A	2,732 b B	9,124 a A	8,039 b B
Caturra V. 4	5,477 b B	7,259 a A	2,855 b AB	3,664 a A	8,332 b AB	10,923 a A
IAC 4376-5	5,572 a AB	4,676 b C	2,568 a BC	2,262 b C	8,140 a BC	6,938 b C
Média	5,497	5,296	2,733	2,719	8,230	8,015
CV (%)	5,66		5,81		5,45	

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Para a progênie Caturra Vermelho 4, provavelmente os incrementos percentuais nos teores de clorofilas e xantofilas + carotenos estão associados aos maiores teores de zinco, ferro, cobre e manganês determinados nas folhas apicais e folhas maduras dessa progênie na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Nesta mesma condição, embora a progênie Caturra Vermelho 4 apresente teores dos micronutrientes cobre, ferro e manganês, e teores de pigmentos superiores aos teores observados para a progênie UFV 4066-5 (Quadros 1 e 2), ainda assim a última progênie destacou-se com maior eficiência de produção de biomassa e eficiência nutricional (ZABINI, 2004).

O índice SPAD não diferiu entre as progênies UFV 4066-5, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 4 (Quadro 3), apresentando diferença estatística apenas entre estas progênies e a progênie IAC 4376-5 (Tupi), sugerindo baixa sensibilidade às diferenças nos teores de clorofila, determinados analiticamente nessas progênies dos cafeeiros. Este resultado não era esperado, uma vez que vários trabalhos encontraram elevada correlação entre os teores de clorofila e as leituras indiretas de clorofila realizadas com o medidor portátil SPAD em diversas culturas (YAMAMOTO et al., 2002).

Deve-se considerar, entretanto, que o medidor portátil SPAD foi desenvolvido com o objetivo de determinar indiretamente o teor de clorofila, o qual apresenta elevada correlação com a atividade fotossintética e o estado nutricional de nitrogênio em diversas culturas avaliadas (FONTES, 2001). A deficiência de nitrogênio nas plantas é amplamente reconhecida pela clorose uniforme de folhas maduras, uma vez que o nitrogênio participa diretamente na constituição das moléculas de clorofila (KOZLOWSKI ; PALLARDY, 1997, MARSCHNER, 1995, TAIZ ; ZEIGER, 1998). A deficiência de zinco pode causar clorose em folhas de cafeeiro; no entanto, este sintoma ocorre preferencialmente em folhas jovens e de maneira desuniforme (clorose entre as nervuras) (MALAVOLTA; VITTI ; OLIVEIRA, 1997), o que explica, em parte, o comportamento diferenciado nas leituras SPAD e nos teores de clorofila para as progênies estudadas.

Na solução em que se omitiu zinco, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou a maior média para concentração de compostos indólicos (INDOL) e, na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, a maior média de INDOL foi verificada para a progênie UFV 4066-5 (Quadro 3).

Quadro 3. Médias da concentração (mg L^{-1}) de xantofilas+carotenóides (X+C), índice SPAD e concentração (g kg^{-1} de matéria fresca) de compostos indólicos (INDOL) de quatro progênies de cafeeiro em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

Progênies	X+C			SPAD			INDOL											
	$6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$			$0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$			$6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$			$0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$								
UFV 4066-5	0,807	a	C	0,611	b	C	58,63	a	A	61,00	a	A	169,00	a	A	113,22	b	B
UFV 4066-3	1,280	a	A	0,906	b	B	60,63	a	A	62,43	a	A	74,41	b	C	99,66	a	B
Caturra V. 4	1,066	b	B	1,396	a	A	57,60	b	A	63,57	a	A	111,38	b	B	156,68	a	A
IAC 4376-5	0,828	a	C	0,663	b	C	50,43	a	B	49,83	a	B	57,96	a	C	66,75	a	C
Média	0,995			0,894			56,82			59,21			103,19			109,08		
CV (%)	8,76						2,87						12,97					

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

No Quadro 4 observa-se que, em resposta à restrição no fornecimento de zinco, apenas a progênie UFV 4066-5 apresentou redução percentual no teor de INDOL, enquanto as demais progênies incrementaram esta característica, com destaque para a Caturra Vermelho 4, exibindo o maior incremento percentual.

Segundo Bartel et al. (2001), as plantas sintetizam ácido indol-3-acético (IAA), conhecido como hormônio do crescimento, a partir de

compostos indólicos e triptofano (Trp). Os compostos indólicos são precursores do Trp, que é um dos principais responsáveis pela síntese de IAA nas plantas, embora existam rotas alternativas independentes de Trp para síntese do IAA. De acordo com Malavolta (1980), na rota biossintética dependente de Trp encontra-se uma enzima de importância crucial, a Trp-sintase, que possui zinco em sua constituição e catalisa a síntese de Trp utilizando como precursores compostos indólicos e serina.

Quadro 4. Médias dos percentuais de redução (valores positivos) ou incremento (valores negativos) das características bioquímicas de quatro progênies de cafeeiro em resposta à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva

Progênies	% de redução ou incremento												
	Ca		Cb		C(a+b)		X+C		SPAD		INDOL		
UFV 4066-5	18,47	a	10,96	a	15,92	a	23,82	a	-4,03	a	b	31,95	a
UFV 4066-3	12,86	a	9,30	a	11,69	a	29,33	a	-3,02	a	b	33,99	b
Caturra Vermelho 4	-		-		-		-		-			-	
	32,62	b	-28,56	b	31,24	b	32,18	b	10,47		b	41,00	c
IAC 4376-5	16,00	a	11,83	a	14,68	a	19,61	a	1,21	a		15,12	b
CV (%)	27,37		29,62		31,10		21,83		29,45			33,12	

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Marschner (1995) afirma que tanto a deficiência quanto o excesso de zinco podem resultar em redução nos teores de IAA na planta, porém, atualmente este processo ainda não está totalmente esclarecido. Pressupõe-se que na progênie Caturra Vermelho 4, sob restrição no fornecimento de zinco, os maiores teores de zinco, ferro, cobre e manganês na folha apical e na folha madura, e a maior concentração de clorofila, estejam relacionados ao metabolismo mais intenso, conduzindo a elevada síntese de compostos indólicos oriundos de esqueletos carbônicos gerados pela maior atividade fotossintética. Na progênie UFV 4066-5, é possível que na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, os baixos teores de zinco, ferro, cobre e manganês observados na folha apical e na folha madura, sob restrição no fornecimento de zinco em solução, associados às menores concentrações de clorofila, sejam responsáveis pela redução na síntese de proteínas e, conseqüentemente, pelo acúmulo de Trp que seria empregado na síntese de IAA, conduzindo ao consumo de compostos indólicos, o que foi constatado pela maior redução percentual de INDOL por esta progênie.

CONCLUSÕES

O fornecimento de zinco incrementa as concentrações deste elemento em todas as partes

analisadas das mudas dos cafeeiros e afeta a absorção ferro, cobre e manganês, evidenciando a existência de variabilidade na absorção destes micronutrientes entre progênies dos cafeeiros.

A progênie Caturra Vermelho 4 (intermediária quanto à exigência e eficiência nutricional para zinco) apresenta elevados teores de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas, sob restrição no fornecimento de zinco.

A progênie UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento) apresenta baixos valores de pigmentos e o maior percentual de redução de compostos indólicos sob restrição no fornecimento de zinco.

A eficiência nutricional para zinco não está relacionada à manutenção de concentrações elevadas de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas de mudas de cafeeiros.

AGRADECIMENTOS

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café (CBP&D/Café) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

ABSTRACT

The zinc is constituent and activator of various enzymes in physiology of plants, and genotypic differences exist in the biochemical mechanisms zinc dependents. Thus, seedlings of 4 coffee plant progenies were submitted to with and without zinc culture for ten months. The experiment was conducted in a greenhouse and nutritive solution in a 4 x 2 factorial scheme (4 progenies and two zinc concentrations), arranged in a completely randomized design, with four repetitions. We evaluated micronutrients, pigments and indolic composites contents. The progenies presented differential response to evaluated characteristics. The results

suggesting zinc efficiency is no dependent of micronutrients, pigments and indolic compost elevate foliar contents in coffee seedlings.

KEYWORDS: Nutritional efficiency. Micronutrients. Chlorophylls. Indolic composts.

REFERÊNCIAS

- BARTEL, B.; LeCLERE, S.; MAGIDIN, M. ; ZOLMAN, B. Inputs to the active indole-3-acetic acid pool: de novo synthesis, conjugate hydrolysis, and indole-3-butyric acid β -oxidation. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 20, p. 198-216, 2001.
- FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.
- FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: Editora UFV, 2001. 122p.
- FONTES, R. L. F. **Purificação de soluções nutritivas para indução de deficiência de zinco e cobre em plantas**. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Departamento de Fitotecnia. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1986. 55f.
- GRUSAK, M. A.; PEARSON, J. N. ; MARENTES, E. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 41-56, 1999.
- KAYA, C.; BURTON, M. A. S. ; HIGGS, D. Responses of tomato cvs grown to fruit-harvest stage under zinc stress in glasshouse conditions. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 2, p. 369-382, 2001.
- KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, 2001.
- KIM, T.; MILLS, H. A. ; WETZSTEIN, H. Y. Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pekan. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 9, p. 1987-2000, 2002.
- KOZŁOWSKI, T. T. ; PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 2. ed. San Diego, Academic Press, 1997. 411p.
- LICHTENTHALER, H. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C. ; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997, 319 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980, 251 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. New York: Academic Press, 1995, 889p.
- MARTINEZ, H. E. P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. Viçosa: Editora UFV, 2002, 61p. (Cadernos Didáticos, 1).
- MISRA, A. ; RAMANI, S. Inhibition of iron absorption by zinc induced Fe-deficiency in Japanese mint. 1991. **Physiol. Plant.**, v. 13, n. 1, p. 37-42, 1991.
- PESTANA, M.; DAVID, M.; VERENNES, A.; ABADÍA, J. ; FARIA, E. A. Responses of “newhall” orange trees to iron deficiency in hydroponics: effects on leaf chlorophyll, photosynthetic efficiency, and root ferric chelate reductase activity. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1610-1620, 2001.

QADAR, A. Selecting rice genotypes tolerant to zinc deficiency and sodicity stresses. I. Differences in zinc, iron, manganese, copper, phosphorus concentrations, and phosphorus/zinc ratio in their leaves. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 3, p. 457-473, 2002.

RENGEL, Z.; RÖMHELD, V. e MARSCHNER, H. Uptake of zinc and iron by wheat genotypes differing in tolerance to zinc deficiency. **J. Plant Physiol.**, v. 152, p. 433-438, 1998.

SACRAMENTO, L. V. S. **Absorção foliar, radicular e translocação de zinco em cafeeiro (Coffea arabica L.)**. Tese (Doutorado em Agronomia), Departamento de Agronomia. Botucatu: UNESP, 1998, 101p.

TAIZ, L. e; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 1998, 792p.

WELCH, M. R. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v.14, n.1, p.49-82, 1995.

YAMAMOTO, A.; NAKAMURA, T.; ADU-GYAMFI, J. J. ; SAIGUSA, M. Relationship between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and by chlorophyll meter (SPAD-502). **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 10, p. 2295-2301, 2002.

YU, Q.; RENGEL, Z. Micronutrient deficiency influences plant growth and activities of superoxide dismutases in narrow-leafed lupins. **Annals of Botany**, v. 83, p. 175-182, 1999.

ZABINI, A. V. **Seleção, caracterização e tolerância diferencial à deficiência de zinco de progênies de cafeeiros (Coffea arabica L.)**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Departamento de Fitotecnia. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004, 105f.