

RONESSA BARTOLOMEU DE SOUZA

**NÍVEIS CRÍTICOS DE ENXOFRE EM SOLOS E EM FOLHAS DE  
CULTIVARES DE CAFÉ**

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do curso de Solos  
e Nutrição de Plantas, para obtenção do  
título de "*Doctor Scientiae*"

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
JUNHO - 1999

RONESSA BARTOLOMEU DE SOUZA

**NÍVEIS CRÍTICOS DE ENXOFRE EM SOLOS E EM FOLHAS DE  
CULTIVARES DE CAFÉ**

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do curso de Solos  
e Nutrição de Plantas, para obtenção do  
título de "*Doctor Scientiae*"

APROVADA: 01 de setembro de 1998

---

Prof<sup>a</sup> Herminia E. P. Martinez  
(Conselheira)

---

Prof. Reinaldo B. Cantarutti  
(Conselheiro)

---

Prof. Renildes L. F. Fontes

---

Dr. Antônio Alves Pereira

---

Prof. Victor Hugo Alvarez V.  
(Orientador)

A Deus.

A minha mãe, Maria Benigna (*in memoriam*).

Ao Samuel, meu filho.

**“A única luta que se perde  
é aquela que se abandona.”**

(Mães da Praça de Maio - Argentina)

## AGRADECIMENTO

**“A resposta certa não importa nada: o essencial é que as perguntas estejam certas.”** (Mário Quintana)

Agradeço especialmente ao professor Victor Hugo Alvarez V. meu orientador, mestre e exemplo de dedicação ao trabalho, que sempre dispensou-me apoio, compreensão e principalmente confiança, mesmo nos momentos em que faltou-me o discernimento suficiente para prosseguir em busca do meu ideal.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de realização do curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto de tese e à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em especial, ao Dr. Antônio Alves Pereira, pelas valiosas sugestões e críticas.

Aos professores Hermínia E. P. Martinez, Reinaldo Bertola Cantarutti e Renildes L. F. Fontes, pelas sugestões e críticas.

Ao César Roriz de Souza, pelo grande auxílio nas análises e condução dos experimentos.

Aos funcionários do Departamento de Solos, pela colaboração e pelo agradável convívio, particularmente, ao Carlos Fonseca, pelo contagioso bom humor e pela indispensável atenção.

Ao Carlos Raimundo Alves de Souza, que no seu silêncio, sempre ofereceu-nos, a mim e ao Samuel, amizade, carinho e apoio em todos os momentos, principalmente, naqueles mais difíceis.

Às sempre amigas Regina e Vilma, companheiras, mesmo quando fisicamente distantes, pelo carinho, pela amizade e pelos momentos de descontração, longos papos, inclusive por telefone (a ponto de dar “cãibra” na orelha), que me fizeram dar boas risadas, independentemente das circunstâncias.

À Luzia, que com sua presença confiável, cotidianamente, proporcionou-me maior disponibilidade de tempo para dedicar-me a esse trabalho.

Aos meus irmãos e sobrinhos, inclusive, Pedro Henrique, pelo carinho especial com que sempre me distinguiram.

A todos que não foram citados, nominalmente, mas que contribuíram para que o meu objetivo fosse alcançado.

## **BIOGRAFIA**

RONESSA BARTOLOMEU DE SOUZA, filha de Alberto Lázaro de Souza e Maria Benígna Costa de Souza, nasceu em 24 de agosto de 1963 em São Bartolomeu, distrito de Ouro Preto - MG.

Em dezembro de 1986, graduou-se em Agronomia, pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

Em fevereiro de 1992, concluiu o mestrado em Fisiologia Vegetal na mesma Universidade.

Em maio de 1992, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de doutorado, na mesma Instituição.

## CONTEÚDO

	Página
EXTRATO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Formas de S no solo.....	3
2.2. Avaliação do S disponível.....	5
2.3. Níveis críticos de S no solo.....	7
2.4. Níveis críticos de S na planta.....	9
 CAPÍTULO 1	
DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE EM SOLOS E EM PLANTAS DE CAFÉ CULTIVADAS EM SOLOS DE DIFERENTE CAPACIDADE TAMPÃO.....	12
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	15

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
3.1. Teores de algumas formas de S no solo avaliados antes do cultivo .....	20
3.2. Resposta do cafeeiro à aplicação de enxofre no solo .....	27
3.3. Níveis críticos de enxofre no solo .....	33
3.4. Formas de enxofre e níveis críticos na planta .....	35
3.5. Relação entre os teores de S no solo e a resposta da planta ....	43
 CAPÍTULO 2	
NÍVEIS CRÍTICOS E EFICIÊNCIA NUTRICIONAL PARA ENXOFRE DE CINCO CULTIVARES DO CAFEEIRO ARÁBICA EM DOIS SOLOS DE MINAS GERAIS .....	46
1. INTRODUÇÃO .....	46
1.1. Cultivares de café .....	46
1.2. Eficiência nutricional e níveis críticos .....	47
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	50
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
3.1. Teores de S disponível no solo avaliados antes do cultivo .....	54
3.2. Resposta dos cultivares à aplicação de enxofre no solo .....	57
3.2.1. Características de crescimento da planta .....	57
3.2.2. Formas de enxofre na planta .....	63
3.3. Níveis críticos de S no solo e na planta e eficiência nutricional ..	67
 3. RESUMO E CONCLUSÕES .....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
APÊNDICE.....	83

## EXTRATO

SOUZA, Ronessa Bartolomeu de, D.S., Universidade Federal de Viçosa, Junho de 1999. **Níveis críticos de enxofre em solos e em folhas de cultivares de café.** Orientador: Victor Hugo Alvarez V. Conselheiros: Herminia E. P. Martinez e Reinaldo Bertola Cantarutti.

Para correlacionar e calibrar métodos de análises de enxofre em solos e em plantas de café, dois experimentos foram realizados em casa de vegetação. Em um experimento, plantas de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí Vermelho, foram cultivadas em amostras de 12 solos empregados na cafeicultura de Minas Gerais; solos com ampla variação de sua capacidade tampão de S (CT). No outro, buscando avaliar as variações nos níveis críticos e na eficiência de uso de S, cinco cultivares de café, Catuaí Vermelho, Icatu Amarelo, Rubi, Acaiá e Mundo Novo, foram cultivados em amostras de um LR de São Sebastião do Paraíso e de um PV de Ponte Nova. Em ambos os ensaios, os tratamentos consistiram de seis doses de S. Após a incubação com S e antes do transplante, foram retiradas subamostras de solo para análises de S disponível com  $\text{NH}_4\text{OAc}$

0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L (AM-Ac), com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) e em HOAc 2 mol/L (FM-Ac). Doze meses após o transplante, foram determinados a altura das plantas, o diâmetro do caule, a área foliar, a produção de matéria seca (PMS) e os teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> de raízes, de caules mais ramos e de folhas novas, indicadoras e maduras. Os níveis críticos de S disponível variaram com o solo e extrator, sendo que, tanto as declividades ( $\Delta S$  recuperado/ $\Delta S$  adicionado) como os níveis críticos obtidos pelo FM-Ac correlacionaram-se bem com o equivalente de umidade, e com os teores de argila e de P remanescente das amostras, características estreitamente relacionadas à CT de S. Os outros dois extratores apresentaram correlações inferiores para as declividades e, os níveis críticos não se correlacionaram com essas características. Entretanto, nas testemunhas, sem adição de S, o S relativo

( $90 \cdot \text{teor S (dose 0)} / \text{NiCri}$ ) obtido com o extrator AM-Ac apresentou melhores correlações com a PMS, com o crescimento relativo [ $\text{CR} = 100 \cdot \text{PMS (dose 0)} / \text{PMS (0,9 PMS máxima)}$ ] e com o conteúdo de S do que os outros dois extratores. Os níveis críticos de S nas folhas indicadoras variaram de 0,14 a 0,24 dag/kg de S total e de 0,014 a 0,039 dag/kg de S-SO<sub>4</sub>, e não se correlacionaram com as características do solo que estimam a CT de S. Nos dois solos estudados, o cultivar Rubi apresentou maiores PMS da parte aérea, das raízes e eficiência de utilização de S seguido pelo Catuaí. Já os cultivares de porte alto, Icatu, Acaiá e Mundo Novo, acumularam menores quantidades de matéria seca na parte aérea e raiz e, apresentaram também, menores eficiências nutricionais para S do que os cultivares de porte baixo. Os valores de níveis críticos de S disponível e de S total e S-SO<sub>4</sub> nas folhas indicadoras do cafeeiro mostraram-se variáveis de acordo com o solo e cultivar estudado.

## ABSTRACT

SOUZA, Ronessa Bartolomeu de, D.S., Universidade Federal de Viçosa, June, 1999. **Sulfur critical levels in soils and in leaves of coffee cultivars.** Adviser: Victor Hugo Alvarez V. Committee members: Herminia E. P. Martinez and Reinaldo Bertola Cantarutti.

Two experiments have been conducted in a greenhouse in order to correlate and calibrate the methods of sulfur analysis in soils and in coffee plants. In the first experiment, coffee plants (*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí Vermelho, were cultivated in samples of twelve soils utilized for coffee planting in the State of Minas Gerais, Brazil. These soils have a wide variation of sulfur buffering capacity (CT). In the second, five coffee cultivars, Catuaí Vermelho, Icatu Amarelo, Rubi, Acaiá and Mundo Novo, were cultivated in samples of Dusk Red Latosol (oxisol) from São Sebastião do Paraíso and Red Yellow Podzolic (ultisol) from Ponte Nova, in order to evaluate the variations in the critical levels and efficiency of sulfur use. In both trials, the treatments had six doses of sulfur. After the incubation with

sulfur and before transplanting it was taken sub-samples of soil for the extraction of sulfur available with  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0.5 mol/L and  $\text{HOAc}$  0.25 mol/L (AM-Ac),  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L of P, in  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) and in  $\text{HOAc}$  2 mol/L (FM-Ac). Twelve months after the planting it was determined the height of the plants, the diameter of the stem, the foliar area, and the dry matter production (PMS). It was determined the contents of total S and  $\text{SO}_4\text{-S}$  in the roots, stems plus stalks, new leaves, indicator leaves and mature leaves. The critical levels of available sulfur varied with the soil and extractor. The slopes and the critical levels obtained by FM-Ac correlated well with the equivalent of humidity and with the clay contents and remaining P from the samples, which are characteristics closely related to the sulfur buffering capacity. The other two extractors presented lower correlation to the slopes, and the critical levels did not correlate with those characteristics. However, in the samples without sulfur addition, the relative S obtained by the extractor AM-Ac presented better correlations with the PMS, the S uptake and the relative growth. The critical levels of S in the indicator leaves varied from 0.14 to 0.24 dag/kg for the total S and from 0,014 to 0,039 dag/kg for the  $\text{SO}_4\text{-S}$ , and did not correlate with the soil characteristics which estimate the sulfur buffering capacity. In both soils, the cultivar Rubi presented bigger shoots and roots PMS and the higher efficiency of S utilization, followed by Catuaí. On the other hand, the tall cultivars, Icatu, Acaiá and Mundo Novo, accumulated smaller amounts of dry matter in the shoots and roots and also presented smaller nutritional efficiencies of S utilization than the short cultivars. The critical levels of the available sulfur, as well as the total S and the  $\text{SO}_4\text{-S}$  in the coffee plants indicator leaves, showed variation as a function of the soils and the cultivars studied.

## 1. INTRODUÇÃO

Em áreas tropicais cultivadas com o cafeeiro, a disponibilidade de nutrientes no solo tem sido fator decisivo para aumentar a produção. Solos naturalmente pobres e ácidos têm sido incorporados ao processo produtivo, havendo respostas positivas à aplicação de fertilizantes. A manutenção de cada nutriente em nível adequado é necessária, para não limitar a produtividade e para maximizar a utilização de fatores como luz e água.

Com relação ao enxofre, em virtude do aumento comprovado de sua deficiência, a preocupação de se avaliar a capacidade do solo em suprir as necessidades deste nutriente para as plantas tem tomado impulso nos últimos anos. A fim de se evitar os efeitos da deficiência de S sobre a qualidade e produtividade das culturas, tem sido necessário adotar estratégias de fertilização com S. Até o momento, na maioria dos casos, essas estratégias baseiam-se em recomendações generalizadas. Entretanto, essas generalizações são inadequadas, uma vez que o nível crítico do elemento e, conseqüentemente sua recomendação, pode variar com a metodologia de extração, com o solo, espécie e cultivar e idade da planta.

Assim, trabalhos de correlação e calibração de métodos de análises de S são imprescindíveis para se avaliar a disponibilidade do nutriente no solo. Os estudos de correlação são importantes na medida em que expressam a

capacidade de predição dos métodos de análises de solos. Esses estudos, por conveniência e motivos econômicos, são geralmente desenvolvidos em casa de vegetação (ALVAREZ V. e DIAS, 1996).

Por outro lado, estudos de calibração são preferencialmente desenvolvidos no campo. Entretanto, quando realizados em casa de vegetação, pode-se empregar um maior número de solos, o que possibilita um estudo mais detalhado das variações nos níveis críticos e nas declividades do nutriente recuperado em função do adicionado. Assim, modelos explicativos dessas variações podem ser obtidos, o que é fundamental para uma recomendação de adubação mais segura e eficiente.

Nos solos tropicais, alguns estudos de avaliação da disponibilidade de nutrientes, especialmente de P, S e Zn, têm mostrado que a capacidade preditiva do método de extração melhora quando este se correlaciona com características do solo que refletem a capacidade tampão (ALVAREZ V. e DIAS, 1996). Assim, além de se correlacionar estreitamente com a absorção pela planta, é desejável que o método de extração tenha comportamento previsível em relação à capacidade tampão dos solos.

Uma vez que o nível crítico do nutriente pode variar com o cultivar e, diante da grande exigência em enxofre pelo cafeeiro, torna-se importante a comparação entre cultivares quanto à eficiência de utilização desse nutriente. A avaliação da eficiência nutricional para a produção de matéria seca ou de frutos, no caso de plantas em fase produtiva, permite identificar cultivares mais eficientes no uso dos nutrientes. Cultivares que produzem mais e exportam relativamente menores quantidades de nutrientes na colheita seriam os mais indicados, dada a inerente limitação de nutrientes nos solos tropicais, especialmente nos de cerrado.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2. 1. Formas de S no solo

O S ocorre no solo em formas orgânicas e inorgânicas. Ambas as formas podem ser metabolizadas rapidamente no solo (ALEXANDER, 1977). As transformações são essencialmente governadas pelas condições ambientais, que afetam a composição e a atividade da microbiota do solo. Em intensidade variável, podem ocorrer quatro processos distintos envolvendo o S do solo:

a) Mineralização ou decomposição de S orgânico com liberação de formas inorgânicas.

b) Assimilação microbológica ou imobilização de S inorgânico em compostos orgânicos das células dos microorganismos.

c) Oxidação de compostos inorgânicos e íons como sulfetos, tiosulfatos, politionatos e S elementar.

d) Redução do sulfato e outros ânions a sulfetos.

O processo de mineralização é o de maior importância em relação à disponibilidade para as plantas. Assim, o fracionamento do S orgânico tem sido estudado para auxiliar na avaliação da disponibilidade de S, já que certas formas de S orgânico são mais facilmente mineralizadas que outras.

A maior reserva de S no solo está na forma orgânica. Na maioria dos solos mais de 90 % do S total encontra-se nessa forma. Entretanto, essa

proporção pode variar consideravelmente com o tipo de solo e a profundidade no perfil. Geralmente a proporção diminui com a profundidade (TISDALE et al., 1985; TAN, 1994).

Muitos trabalhos têm mostrado a relação entre o C orgânico, N total e S total. No entanto, esta relação pode apresentar elevada variabilidade em consequência de variações no material de origem, nos fatores de formação do solo ou mesmo em função do manejo (TISDALE et al., 1985; DIAS, 1992). Observa-se ainda que as relações N/S da matéria orgânica do solo são menos variáveis do que as C/S e estão geralmente na faixa de 6 a 8:1, denotando uma relação mais estreita entre o N total e S orgânico do que entre o C orgânico e S orgânico (TISDALE et al., 1985).

As principais formas de S inorgânico no solo são o sulfato em solução, o sulfato adsorvido à fração coloidal, as formas reduzidas (dióxido de enxofre, sulfito, tiosulfato, enxofre elementar e sulfeto) e o sulfato ocluso ou co-precipitado.

O sulfato adsorvido é uma importante fonte de S para as plantas nos solos tropicais, tanto que NEPTUNE et al., 1975, observaram que essa forma de S representava, em média, 58 % do S disponível em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  500 mg/L de P em  $\text{H}_2\text{O}$  num grupo de solos brasileiros, enquanto, nos solos de Iowa, constituía apenas 2 %.

Em solos bem drenados, as formas reduzidas são facilmente oxidadas a sulfato. Porém, em solos alagados ou condições de anaerobiose as formas reduzidas, principalmente sulfetos e  $\text{H}_2\text{S}$  são importantes. Já em solos calcários ou sob condições de aridez podem ocorrer formas de S-sulfato oclusas ou co-precipitadas com depósitos de carbonato de cálcio, as quais são pouco disponíveis para as plantas (WILLIAMS e STEINBERGS, 1964).

As plantas absorvem o S preferencialmente na forma de sulfato, íon que se encontra no solo em diferentes graus de disponibilidade, pois além de estar na solução do solo, pode estar formando combinações pouco solúveis com alumínio e ferro, pode estar precipitado, ou ainda adsorvido. A quantidade de sulfato em solução depende do equilíbrio entre os processos de adsorção e dessorção, de imobilização e mineralização, de absorção pelas plantas e de lixiviação (ALVAREZ V. e DIAS, 1996).

## 2.2. Avaliação do S disponível

Existe uma grande diversidade de extratores e técnicas para se avaliar o teor de S disponível do solo. Além disso, um mesmo reagente com solventes diversos ou com diferentes pH, da solução extratora final, pode ter capacidade de extração completamente diferente. Outro aspecto relevante são os procedimentos da marcha analítica tais como: relação solo:extrator, tempo de agitação, secagem, aquecimento, dentre outros. Conseqüentemente, a interpretação agrônômica dos resultados de análise do S disponível torna-se bastante difícil (VITTI, 1989).

Segundo REISENAUER (1975), os extratores usados para S disponível podem ser classificados em três grupos que extraem:

- a) A fração de sulfato prontamente solúvel.
- b) Além do sulfato prontamente solúvel, parte do sulfato adsorvido.
- c) Sulfato solúvel, parte do sulfato adsorvido e porções do S orgânico.

Em solos intemperizados com grande capacidade de adsorção de sulfato, a fração de sulfato prontamente solúvel é relativamente pequena. Assim, acredita-se que os extratores do segundo e terceiro grupos sejam mais eficientes na avaliação do S disponível nas regiões tropicais (REISENAUER et al., 1973).

Em nossas condições os dois extratores mais utilizados, que melhor expressam o S disponível para as plantas, tem sido o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em HOAc 2mol/L (HOEFT et al., 1973) e o  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L (BARDSLEY e LANCASTER, 1960).

O uso do  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  baseia-se no deslocamento do ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  pelo  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , o qual fica fortemente retido deixando o sulfato em solução. BISSANI (1985), trabalhando com 50 solos do RS, encontrou melhores correlações entre o S extraído por  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, e o S absorvido por plantas de colza em comparação ao mesmo extrator aquecido e em HOAc 2 mol/L. Também SINGH e SARKAR (1996), testando vários extratores em 21 solos, demonstraram

o melhor desempenho do  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  em relação aos demais.

Por outro lado, FONTES et al. (1982b), trabalhando com solos de MG, mostraram ser o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L o extrator mais adequado para avaliar a disponibilidade de S para plantas de sorgo. HARON e HANSON (1988) também encontraram altíssima correlação entre o S disponível por esse extrator e a absorção por plantas de milho. Eles sugeriram que essa forma de S pode servir como estimador do pool lábil de S, devido à estreita relação ( $r=0,99$ ) entre o S disponível e o sulfato lábil do solo observada.

ALVAREZ V. et al. (s.d.), estudando amostras de 14 diferentes solos de cerrados de MG, obtiveram estreitas correlações negativas entre os teores obtidos com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L e os teores de argila, C orgânico, N total e S do solo e S de reserva. Entretanto, não foram obtidas correlações com o S disponível extraído com o  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L e o  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol/L. Esse trabalho mostrou também que  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L tem capacidade de colocar em solução maiores quantidades de S disponível em solos arenosos do que em solos argilosos. Os autores acreditam que a diferença de comportamento entre os três extratores deve-se ao fato de apenas este extrator ter sido afetado pela capacidade tampão de sulfatos dos solos. E é exatamente essa sensibilidade à capacidade tampão que foi verificada no trabalho de BISSANI (1985) quando observou que o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc extraía menor quantidade de S nos solos argilosos.

O extrator  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L permite uma boa recuperação quando da adição de pequenas quantidades de sulfatos ao solo e o método apresenta grande reprodutibilidade, cuja medição apresenta coeficientes de variação entre 1 e 2% (BARDSLEY e LANCASTER, 1960).

### **2. 3. Níveis críticos de S no solo**

O nível crítico de um nutriente, tanto no solo quanto na planta, refere-se à sua concentração, abaixo da qual existe alta probabilidade de resposta da produção à sua adição ao solo. Ou ainda, é o valor da concentração (no solo, ou na planta) do nutriente, que equivale à disponibilidade necessária para se obter a produção de máxima eficiência econômica (ALVAREZ V., 1996). Em condições de casa de vegetação, procura-se aproximar desta situação, considerando como valor crítico aquele teor (no solo, ou na planta) do elemento que corresponde a 90 % da produção máxima estimada.

REISENHAUER et al. (1973), resumindo dados dos Estados Unidos, apresentaram a faixa de teores de 6 a 12 mg/dm<sup>3</sup> de S disponível em diversos extratores, como aquela acima da qual respostas não são esperadas. Mais recentemente, em trabalhos citados por JOHNSON e FIXEN (1990) foram registrados níveis críticos em torno de 30 mg/dm<sup>3</sup> para o NH<sub>4</sub>OAc em HOAc e de aproximadamente 10 mg/dm<sup>3</sup> de S para o Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc (ISLAM e PONNAMPERUMA, 1982; BANSAL et al., 1983).

Similarmente, VITTI (1989) compilou dados de pesquisas no Brasil e encontrou níveis críticos variando de 1,2-12 para o extrator Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc e valores um pouco superiores, 7-17 mg/dm<sup>3</sup> de S extraídos com o NH<sub>4</sub>OAc em HOAc. Assim, o referido autor elaborou uma tabela expedita (aproximativa) para interpretação dos teores de S disponível no solo, considerando como adequados teores >10 e >15 mg/dm<sup>3</sup> de S para o fosfato monocálcico e acetato de amônio respectivamente.

Como se vê, tanto nos EUA quanto no Brasil, os autores supracitados consideraram teor adequado um único valor para vários solos diferentes, como se o nível crítico do nutriente fosse independente da capacidade tampão dos solos, procedimento que, segundo ALVAREZ V. (1988), parece pouco razoável. Não obstante, os mesmos trabalhos evidenciaram a influência do extrator sobre o nível crítico de S. Outro aspecto também importante refere-se à profundidade de amostragem no perfil, pois, em determinadas situações, pode ocorrer acúmulo de S nas camadas subsuperficiais, especialmente quando se emprega gesso e, ou, superfosfato simples, prática muito comum na cultura do café. Segundo JOHNSON e FIXEN (1990), incluindo o S do subsolo o nível crítico pode variar

consideravelmente, pois, na realidade, podem existir grandes diferenças nas características mineralógicas, físicas, químicas e físico-químicas das amostras de solo da camada superficial e do subsolo. Além desses, os níveis críticos variam também com o tipo de solo, a espécie de planta, o cultivar, a disponibilidade de outros nutrientes e o estágio de crescimento. Por isso, eles devem ser definidos em condições específicas de solo, clima, cultura e manejo e o equilíbrio, entre os outros nutrientes no solo, evidentemente, deve aproximar-se da condição ótima.

Conforme colocado anteriormente, observa-se que, na maioria dos trabalhos sobre a disponibilidade de S, embora conduzidos com grande número de solos, procurou-se definir um único valor crítico para todos eles. Assim, argumenta ALVAREZ V. (1996), que a capacidade de previsão do método torna-se relativamente baixa. O uso de um único nível crítico justificar-se-ia apenas para solos que apresentassem a mesma declividade para o teor do S recuperado em função da dose de S adicionada. E a capacidade preditiva aumenta quando se agrupam os solos por região, textura, ou por capacidade de adsorção de sulfatos (REHM e CADWELL, 1968; BARDSLEY e LANCASTER, 1960; SAUNDERS e COOPER, 1975, respectivamente.)

Com esse propósito, FONTES et al. (1982a, 1982b) e ALVAREZ V. et al. (1983) determinaram as curvas de resposta do vegetal às doses aplicadas de S para cada solo, e obtiveram as regressões lineares do S disponível em função do S adicionado. De cada curva de resposta de produção se obteve a dose recomendável, que foi substituída na regressão do S disponível em função do S adicionado para se obter o nível crítico.

Seguindo esta metodologia, ALVAREZ V. et al. (1983) cultivaram mudas de eucálio em 14 solos de cerrado de Minas Gerais e encontraram para o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc declividades  $\Delta S$  recuperado/ $\Delta S$  adicionado variáveis entre 0,038 e 0,249 gerando, com as doses recomendáveis, níveis críticos variando entre 1,8 e 14,9  $\text{mg}/\text{dm}^3$  de S. Tanto as declividades como os níveis críticos correlacionaram-se bem com equivalente de umidade, teor de argila, S remanescente e P remanescente, características essas que se mostram estreitamente relacionadas à capacidade tampão de sulfatos (CTS).

Similarmente, FONTES et al. (1982b), utilizando o mesmo extrator, observaram para plantas de sorgo, níveis críticos variáveis de 4,7 a 12 mg/dm<sup>3</sup> de S, em função da CTS dos solos.

As correlações significativas, encontradas entre os níveis críticos de enxofre e a CTS, P remanescente, S remanescente, teor de argila, equivalente de umidade, entre outras, possibilitam estabelecer modelos matemáticos úteis para se calcular a recomendação da fertilização sulfatada. Desta forma, o nível crítico de S num solo pode ser estimado, com base em alguma de suas características que se relaciona, estreitamente, com a capacidade tampão de sulfatos. Semelhantemente, as doses de S para se atingir o referido nível crítico também podem ser calculadas com base em alguma característica que se correlacione com o coeficiente linear ( $\Delta S$  recuperado/ $\Delta S$  adicionado) da equação ajustada entre o S recuperado pelo extrator químico em função das doses aplicadas (ALVAREZ V. e DIAS, 1996).

#### **2. 4. Níveis críticos de S na planta**

Os níveis críticos são, freqüentemente, expressos em relação a folhas de idade fisiológica e localização definidas na planta (BATES, 1971). Para o cafeeiro, geralmente é utilizado o 3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> pares de folhas (indicadoras) a contar do ápice, de ramos situados na altura média da planta. Isso porque os teores de nutrientes no tecido vegetal variam com a espécie e, ou, o cultivar, as condições do ambiente (umidade, temperatura e luz), o tecido e a sua idade, a forma do nutriente considerado, os níveis dos nutrientes e as suas interações, os quais refletem seus efeitos na absorção, no transporte e na redistribuição interna do elemento (BATES, 1971; SUMNER, 1977)

Segundo FAGERIA (1984), as plantas não toleram deficiência acentuada de um elemento essencial, mas algumas podem absorver mais eficientemente o nutriente do solo. Assim, o autor sugere que a tolerância à deficiência nutricional pode ser resultante da alta capacidade de extração do nutriente em baixa

disponibilidade no solo.

O diagnóstico de deficiência de S nas plantas é geralmente feito por meio das seguintes determinações: concentração de S total, concentração de S-SO<sub>4</sub>, relação S-SO<sub>4</sub>/ S total e razão N total/ S total.

O S total fornece apenas uma indicação sobre a disponibilidade de S no solo, uma vez que as plantas adquirem o S da solução do solo como sulfato. Entretanto vários fatores devem ser considerados quando interpretamos dados de S total porque seu teor pode variar com a parte da planta, a idade, o tecido e as interações com outros elementos (TAN, 1994).

Por outro lado, o teor de S-SO<sub>4</sub> mostra-se como um índice mais adequado para diagnosticar deficiências de S na planta. O S absorvido em excesso à demanda da planta para síntese de compostos orgânicos é armazenado no vacúolo celular, na forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (TAIZ e ZEIGER, 1991). Em *Lemna minor*, o sulfato vacuolar representa cerca de 99% do S total, demonstrando que o vacúolo é um importante sítio de acúmulo do excesso de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em certas espécies (RENNENBERG, 1984). HUANG et al. (1992) demonstraram altas correlações entre os teores de S-SO<sub>4</sub> nas folhas de diversas leguminosas e as quantidades de S aplicadas. Esse resultado foi confirmado também por KOUNO e OGATA (1988) para folhas de várias forrageiras. Nesse trabalho foram encontradas altas correlações entre as concentrações foliares de S-SO<sub>4</sub> e os dados de resposta da planta ao S adicionado. Assim, eles sugerem que o teor de S-SO<sub>4</sub> (dag/kg na matéria seca) pode refletir o status nutricional de S da planta, sendo que maior concentração de S inorgânico estaria associada à maior disponibilidade de S no solo.

Assim, sob condições de deficiência de S no solo, os teores de sulfato na planta são baixos e a inibição da síntese proteica ocasiona acúmulos de N orgânico solúvel (amidas) e de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Para MENGEL e KIRKBY (1987) este fato contrasta com aquele que ocorre sob deficiência de N, onde os teores de N solúvel diminuem, e os de sulfato permanecem normais. Todavia, esta afirmativa pode ser contestada por FRIEDRICH et al. (1979ab) que observaram um acúmulo de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em plantas de milho submetidas à deficiência de N e

suprimento normal de S, em relação à situação de disponibilidade adequada de N no solo.

Contudo, a concentração de S-SO<sub>4</sub> é também controversa, uma vez que, em trabalhos com trigo (FRENEY et al., 1978; SPENCER e FRENEY, 1980) e com capim colômbio (SMITH e DOLBY, 1977), foi demonstrado que o nível crítico da razão S-SO<sub>4</sub>/S total foi menos afetado pela idade da planta e pelo suprimento de N e que esse índice correlacionou-se mais estreitamente com a produção do que o teor de S-SO<sub>4</sub>. Recentemente, PINKERTON e RANDALL (1995) e ZHAO et al. (1996), não encontraram nenhuma vantagem da razão S-SO<sub>4</sub>/S total sobre o teor de S total ou de S-SO<sub>4</sub> isolados. Além de requerer duas análises, ZHAO et al. (1996) alegam ser pouco lógico um índice cujo nível crítico seja constante em diferentes estádios de crescimento. Isso porque o requerimento do nutriente está mais relacionado à taxa de crescimento do que à produção de matéria seca no tempo da medição, sendo que a taxa de crescimento será variável nos diferentes estádios. Assim, acreditam ser o S-SO<sub>4</sub> o índice mais eficiente em virtude de sua sensibilidade às mudanças no suprimento de S.

Todavia, JONES (1986) argumenta que embora varie muito mais em função das doses de S adicionadas ao solo, os coeficientes de variação nas determinações de S-SO<sub>4</sub> são, usualmente, maiores que aqueles do S total.

A razão N total/ S total é também considerada um índice satisfatório, apresentando-se relativamente independente do estágio de crescimento da planta e, tal constância é justificada pela relação N/S aproximadamente rígida nas proteínas vegetais (BANSAL et al., 1983; BANSAL e PAL, 1987). Entretanto, a razão per se não indica se os teores de N e, ou, de S são excessivos ou deficientes (TAN, 1994). Ademais, segundo ZHAO et al. (1996), os níveis críticos obtidos de uma relação linear, como o é a razão N/S, são pouco exatos, justamente, por faltar a zona de transição da suficiência para a deficiência quando a razão aumenta.

## **CAPÍTULO 1**

### **DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE EM SOLOS E EM PLANTAS DE CAFÉ CULTIVADAS EM SOLOS DE DIFERENTE CAPACIDADE TAMPÃO**

#### **1. INTRODUÇÃO**

O enxofre (S) é exigido pelas culturas em quantidades relativamente grandes (TISDALE et al., 1985). Seus teores na planta são similares ou até superiores aos do fósforo (P). O cafeeiro, por exemplo, apresenta teores de S mais elevados que os de P (MALAVOLTA, 1986).

O S é constituinte de proteínas e assim está intimamente ligado ao metabolismo do nitrogênio (N), sendo inclusive usada a relação N/S para definir o status nutricional da planta quanto a esse elemento. Não apenas com o N, mas o equilíbrio ótimo entre o S e outros nutrientes é um aspecto importante a ser considerado num programa de recomendação de adubação. Trabalhos de ALVAREZ V. et al. (1987a, 1987b) demonstraram que a exigência de S pela cultura depende do quanto de N e P é adicionado. Foi observado que os aumentos nas adições de N e P exigiram maior adição de S para se obter maior crescimento de plantas de café. Isso provavelmente explica a comum falta de resposta a aplicações isoladas de S nas culturas, relegando a sua deficiência a um plano secundário. Hoje em dia, entretanto, tem se constatado um aumento na deficiência de S, principalmente nas regiões tropicais, inclusive no Brasil (VITTI, 1989). Tal fato deve-se principalmente ao uso de solos

naturalmente pobres em S e ao aumento considerável no uso de fertilizantes concentrados que não possuem S em sua composição. Com relação às áreas de cerrado, LOPES (1983) chama a atenção para o fato de que o cultivo intensivo por vários anos pode esgotar as baixas reservas naturais de S, agravando ainda mais a sua deficiência.

Respostas ao S são conhecidas em solos de vários estados do Brasil, em culturas de café, milho, algodão, feijão, soja e forrageiras, especialmente em solos sob vegetação de cerrado. Buscando estudar os efeitos de fontes e doses de S na cultura do cafeeiro, PEDROSO et al. (1986) verificaram resposta significativa à adição de S, com tendência para aumentar com o passar dos anos. Similarmente, Nadai (1985) citado por VITTI et al. (1988) utilizando como fontes de S o sulfato de amônio, K-mag e gesso, também encontrou respostas positivas ao nutriente na produção de grãos do café Mundo Novo.

No Brasil, poucos são os trabalhos sobre S na cultura do café e, destes, quase todos utilizaram gesso como fonte de S. Assim, o efeito devido ao S confunde-se com aquele ocasionado pela movimentação do cálcio. Isso porque, em solos intemperizados com altos teores de  $Al^{3+}$  nas camadas subsuperficiais, independente do teor de S, a descida do cálcio por si só, já é benéfica, uma vez que reduz a acidez trocável dessas camadas, favorecendo o crescimento das raízes e, conseqüentemente, aumentando o volume de solo explorado em nutrientes e água.

A análise de solos para S tem sido relativamente pouco usada, sendo muito limitado o número de estudos sobre a disponibilidade desse nutriente nos solos (ALVAREZ V. e DIAS, 1996).

A disponibilidade de um nutriente pode ser definida como sendo a quantidade de nutriente, recuperada do solo por métodos de extração, que se correlaciona, estreitamente, com o conteúdo do nutriente na planta. Com esta finalidade, a pesquisa realiza-se, mediante estudos de correlação e calibração de métodos de análise de solo e de material vegetal. Na fase de calibração, são definidos os níveis críticos e as doses recomendáveis de nutrientes, a serem adicionadas ao solo (ALVAREZ V., 1996).

Especificamente para o cafeeiro, informações relativas ao nível crítico de S no solo praticamente inexistem no Brasil. PEDROSO et al. (1986), baseando-se em um ensaio de campo conduzido num solo podzólico em Olímpia-SP,

usando o extrator  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L e  $\text{HOAc}$  0,25 mol /L, sugeriram que o nível crítico estaria próximo de 15  $\text{mg/dm}^3$  de S.

Analogamente, em material vegetal, o S tem sido o menos analisado dentre os macronutrientes e, no Brasil, poucos são os trabalhos onde se determinaram teores de S total ou de sulfato ( $\text{S-SO}_4$ ) e praticamente inexistem estudos para se definir níveis críticos (ALVAREZ V. e DIAS, 1996). Teores de S total em folhas de cafeeiro variando de 0,10 a 0,15 e de 0,16 a 0,25  $\text{dag/kg}$  são considerados deficientes e adequados respectivamente (MALAVOLTA, 1986). Para o  $\text{S-SO}_4$ , é sugerido, como adequado, um teor maior que 200  $\text{mg/kg}$  (matéria seca) nas folhas do cafeeiro (GUIMARÃES e PONTE, 1978).

Dessa forma, verifica-se a necessidade de calibrar, para o cafeeiro, importante cultura de exportação no Brasil, métodos de análise de S no solo e na planta e de estabelecer níveis críticos de acordo com a capacidade tampão de sulfatos dos solos.

O presente trabalho teve por objetivos avaliar a disponibilidade do S para o cafeeiro por três extratores químicos de S, em amostras de diferentes solos empregados na cafeicultura de Minas Gerais; estudar algumas formas de S no solo e no cafeeiro; definir níveis críticos de S no solo e na planta; e gerar modelos explicativos das variações nos níveis críticos e nas declividades do S recuperado pelos extratores em função das doses adicionadas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizaram-se amostras superficiais (0 - 20 cm) de nove solos e subsuperficiais (40 - 60 cm) de três deles, coletadas em regiões cafeeiras do Estado de Minas Gerais nos municípios Manhuaçu (MAN), Patrocínio (PAT), São Sebastião do Paraíso (SSP), Lavras (LAV), Machado (MAC), Viçosa (VIC), Ponte Nova (PTN) e Monte Santo (MTS), cujas características químicas e físicas são apresentadas no Quadro 1.

As amostras dos solos foram secas ao ar e passadas em peneira de 4 mm. Em seguida, subamostras de 5,5 dm<sup>3</sup> foram incubadas com uma mistura de CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> comerciais na relação de 4:1 mols. A quantidade de corretivo foi calculada baseando-se nos teores de argila e de Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis (COMISSÃO..., 1989). Após aplicação do corretivo, as amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas e incubadas, mantendo-se a umidade em torno de -10 kPa, por um período de 30 dias.

Após secagem e homogeneização, as amostras de solos receberam as doses de enxofre, definidas de acordo com o teor de P remanescente de cada amostra e dos níveis 0; 0,5; 1; 2; 3; e 5. Também as doses de P foram definidas de acordo com o valor de P remanescente (ALVAREZ V. e FONSECA, 1990). Assim, os solos LVh<sub>a</sub> (MAN), LVh<sub>b</sub> (MAN), LV<sub>b</sub> (PAT) e LR<sub>b</sub> (SSP) receberam de 0 a 140 mg/dm<sup>3</sup> de S e 350 mg/dm<sup>3</sup> de P; os solos LV<sub>a</sub> (PAT), LR<sub>a</sub> (LAV), LE<sub>1a</sub> (MAC), e LR<sub>a</sub> (SSP), de 0 a 120 mg/dm<sup>3</sup> de S e 310 mg/dm<sup>3</sup> de P; os solos LU<sub>a</sub> (VIC) e LE<sub>2a</sub> (MAC), de 0 a 100 mg/dm<sup>3</sup> de S e 270 mg/dm<sup>3</sup> de P; e os solos PV<sub>a</sub> (PTN) e AQ<sub>a</sub> (MTS), de 0 a 80 mg/dm<sup>3</sup> de S

Quadro 1 - Características físicas e químicas das amostras de solos estudados

Característica	SOLO											
	LVh <sub>a</sub> MAN	LVh <sub>b</sub> MAN	LV <sub>a</sub> PAT	LV <sub>b</sub> PAT	LR <sub>a</sub> SSP	LR <sub>b</sub> SSP	LR <sub>a</sub> LAV	LE <sub>1a</sub> MAC	LE <sub>2a</sub> MAC	LU <sub>a</sub> VIC	PV <sub>a</sub> PTN	AQ <sub>a</sub> MTS
Areia grossa (%) <sup>1/</sup>	17	29	7	8	6	5	16	21	8	22	50	58
Areia fina (%) <sup>1/</sup>	11	16	5	5	23	27	7	9	5	12	22	33
Silte (%) <sup>1/</sup>	9	4	17	13	12	19	5	8	6	4	6	3
Argila (%) <sup>1/</sup>	63	51	71	74	53	49	72	62	81	62	22	6
Dens. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>2/</sup>	1,11	1,09	0,99	0,98	1,28	1,22	1,04	1,02	1,07	1,06	1,32	1,45
Eq. umidade (kg/kg)	0,236	0,251	0,334	0,323	0,225	0,234	0,286	0,246	0,238	0,264	0,144	0,052
Água retida (kg/kg)												
-10 kPa	0,253	0,275	0,375	0,359	0,245	0,271	0,330	0,252	0,253	0,276	0,162	0,066
-30 kPa	0,232	0,258	0,336	0,316	0,219	0,225	0,277	0,235	0,236	0,260	0,134	0,049
-1.500 kPa	0,184	0,200	0,231	0,227	0,175	0,185	0,218	0,197	0,195	0,220	0,092	0,028
Matéria Org. (dag/kg) <sup>3/</sup>	7,09	5,21	4,88	2,62	2,65	1,41	5,02	3,38	3,17	5,00	1,46	1,12
pH-H <sub>2</sub> O <sup>4/</sup>	5,03	4,93	4,97	5,10	5,03	5,20	4,83	4,97	5,33	5,03	4,87	5,57
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	1,20	0,97	0,30	0,07	0,20	0,03	0,90	0,17	0,03	0,53	0,40	0,13
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	1,17	0,33	0,13	0,07	0,53	0,27	0,10	0,57	1,17	0,97	0,53	0,87
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	0,57	0,10	0,03	0,00	0,20	0,00	0,03	0,20	0,30	0,17	0,13	0,30
SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>6/</sup>	1,90	0,48	0,26	0,10	0,80	0,30	0,17	0,82	1,52	1,21	0,71	1,30
t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>7/</sup>	3,10	1,45	0,56	0,17	1,00	0,33	1,07	0,99	1,55	1,74	1,11	1,43
H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>8/</sup>	8,10	8,80	5,60	2,70	5,20	2,80	6,70	5,10	4,20	6,80	3,90	2,20
T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>9/</sup>	10,00	9,28	5,86	2,80	6,00	3,10	6,87	5,92	5,72	8,01	4,61	3,50
V (%) <sup>10/</sup>	19,00	5,18	5,07	3,57	13,33	9,68	2,47	13,85	26,57	15,11	15,40	37,14
m (%) <sup>11/</sup>	38,71	66,90	53,57	41,18	20,00	9,09	84,11	17,17	1,94	30,46	36,04	9,09
K (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>12/</sup>	64,00	18,00	38,67	10,67	29,00	10,33	15,00	19,00	19,67	28,33	18,67	49,67
P (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>12/</sup>	2,67	0,63	0,47	0,00	0,83	0,13	0,47	0,57	6,50	1,47	1,27	1,23
P remanescente (mg/L)	4,57	3,87	8,40	2,17	9,57	3,87	8,67	9,20	15,83	14,70	31,63	45,90

1/ Método da pipeta; 2/ Método da proveta; 3/ Método Walkley e Black; 4/ Relação solo-água 1:2,5; 5/ Extrator KCl 1 mol/L; 6/ Soma de bases; 7/ CTC efetiva; 8/ Extrator acetato de cálcio 0.5 mol/L pH 7,0; 9/ CTC a pH 7,0; 10/ Porcentagem de saturação de bases; 11/ Porcentagem de saturação de alumínio; 12/ Extrator Mehlich-1; LVh - Latossolo Vermelho-Amarelo húmico; LV - Latossolo Vermelho-Amarelo; LR - Latossolo Roxo; LE - Latossolo Vermelho-Escuro; LU Latossolo Una; PV Podzólico Vermelho-Amarelo; AQ - Areia Quartzosa; a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

e 210 mg/dm<sup>3</sup> de P. Utilizaram-se como fontes de S o (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e de P o Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O, aplicados de forma distribuída em todo volume de solo. Simultaneamente, foram aplicadas doses de nivelamento para N e K. A umidade foi ajustada, para -10 kPa e essas amostras umedecidas foram mantidas em sacos plásticos fechados por 30 dias. Após isso, realizou-se amostragem dos solos e transferência das amostras de 5,0 dm<sup>3</sup> para vasos plásticos.

Em seguida, foram transplantadas para cada vaso quatro plântulas de café, em estágio de “orelha de onça”, e, após dois desbastes, mantiveram-se as duas plantas mais desenvolvidas. Utilizou-se o cultivar de café (*Coffea arabica* L.) Catuaí Vermelho (LCH2077-2-5-44). Em virtude da intensa radiação solar e das elevadas temperaturas no interior da casa de vegetação durante o verão, fez-se necessário o uso de sombreamento (tela sombrite) a fim de garantir a sobrevivência das plantas nesse período.

Os tratamentos originaram-se da combinação de 12 solos e 6 doses de S e foram distribuídos em blocos casualizados com 3 repetições.

Durante o período de cultivo (12 meses), a umidade do solo foi mantida em torno de -10 kPa pela adição de água destilada. Mensalmente, foram aplicados a cada unidade experimental 20 mg/dm<sup>3</sup> de N, fornecidos como (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO em forma de solução. Os micronutrientes também foram fornecidos em solução, de modo que fossem adicionados a cada dm<sup>3</sup> de solo um total de 0,813 mg de B (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), 3,664 mg de Mn (MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O), 4 mg de Zn (ZnCl<sub>2</sub>), 1,329 mg de Cu (CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), 1,556 mg de Fe (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) e 0,15 mg de Mo (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) (ALVAREZ V., 1974). Essas doses foram igualmente parceladas em seis aplicações. Especificamente no Latossolo Roxo de São Sebastião do Paraíso, profundidade 40-60 cm (LR<sub>b</sub>), as plantas de café exibiram sintomas de deficiência de Zn por volta do 4<sup>o</sup> mês após o transplântio. Nesse solo, foi então adicionado mais 4 mg/dm<sup>3</sup> de Zn (ZnCl<sub>2</sub>), parceladamente, em quatro aplicações.

Aos 12 meses após o transplântio, avaliaram-se a altura das plantas e o diâmetro do caule a 2 cm do solo. Em seguida procedeu-se à colheita, sendo que as plantas foram divididas em sistema radicular, caule + ramos, folhas novas (gemas, 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> pares), folhas indicadoras (3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> pares) e folhas maduras (restantes). Após a secagem, o material vegetal foi pesado e,

subseqüentemente, moído e mineralizado por digestão nítrico-perclórica e, no extrato obtido, procedeu-se à dosagem de S por turbidimetria (BLANCHAR et al., 1965), com adaptação de ALVAREZ V. e DIAS (s.d.a). Na matéria seca foi determinado ainda o teor de S-SO<sub>4</sub>, extraído com ácido acético, 0,333 mol/L (JONES, 1975) e dosado turbidimetricamente (BLANCHAR et al., 1965). O teor de S orgânico foi calculado por diferença entre o S total e o S-SO<sub>4</sub>.

Amostras de solo de todas as unidades experimentais foram secas e passadas em peneira de 2 mm para análise de S do solo (SSOL) e de S disponível. O S do solo foi obtido pelo método da fusão. O S disponível foi avaliado por três extratores: NH<sub>4</sub>OAc 0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L [AM-Ac] (BARDSLEY e LANCASTER, 1960); com Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em H<sub>2</sub>O [FM-Aa] (FOX et al., 1964); e com Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L [FM-Ac] (HOEFT et al., 1973). Por diferença entre o S do solo (SSOL) e o S disponível em AM-Ac obteve-se o S de reserva [SRES] (BARDSLEY e LANCASTER, 1960). Todas as formas de S foram quantificadas por turbidimetria conforme CHESNIM e YIEN (1950), com adaptação de ALVAREZ V. e DIAS (s.d.a).

Equações de regressão foram ajustadas à produção de matéria seca da parte aérea das plantas, aos teores de S recuperados pelos três extratores e aos teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> das folhas indicadoras como variáveis dependentes das doses de S adicionadas em cada solo. Com as equações de produção de matéria seca em função do S aplicado, estimaram-se as doses recomendáveis de S, doses necessárias para se atingir 90 % da produção máxima. Pela substituição das doses recomendáveis nas equações que relacionam os teores de S no solo e nas folhas indicadoras com as doses de S adicionadas, foram obtidos os níveis críticos deste nutriente, por solo, para os três extratores e na planta considerando-se o S total e S-SO<sub>4</sub> nas folhas indicadoras.

Para avaliar a capacidade dos extratores em prever a disponibilidade de S para o cafeeiro nas testemunhas, foram feitas correlações dos teores de S disponível na dose zero e do S relativo (SR= 90 . (Teor S (dose 0)/ nível crítico)) avaliados pelos três extratores com a produção de matéria seca da parte aérea (PMS), com o crescimento relativo (CR= 100 . (PMS (dose 0)/ PMS (0,9 PMS máxima))) e com o conteúdo de S da parte aérea (CS) na dose zero.

Em seguida, entre as mesmas variáveis, outras correlações foram calculadas para o conjunto de todas as doses, incluindo a dose zero.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Teores de algumas formas de S no solo avaliados antes do cultivo

As várias formas de S analisadas (Quadro 2) mostraram clara diferença entre seus valores médios. E, conforme esperado, o S do solo (SSOL) apresentou maiores valores que o S de reserva (SRES) e estes, bem maiores que as formas disponíveis. O S de reserva variou de 82 a 96 % do S do solo, em média 90 %, valor que concorda com aquele geralmente encontrado na literatura.

Os teores das formas SSOL e SRES apresentaram-se associados ao teor de matéria orgânica das amostras,  $r = 0,811^{**}$  e  $0,824^{**}$  respectivamente (excluindo-se o solo  $PV_a$ ). Para os solos de valores mais elevados nessas duas formas de S, verificou-se a seguinte ordem decrescente:  $LVh_a > LVh_b > LU_a > LR_a \sim PV_a > LV_a > LE_{1a} \sim LE_{2a}$ , que coincide com a redução no teor de carbono orgânico (Quadro 1), excetuando-se a amostra  $PV_a$ . Embora com baixo teor de matéria orgânica (1,46 dag/kg), o solo de Ponte Nova ( $PV_a$ ) é um podzólico, portanto mais jovem que os demais, latossolos, o que pode justificar seus teores relativamente altos de enxofre do solo e de reserva. O solo mais arenoso ( $AQ_a$ ) foi o que apresentou menores teores de SSOL e de SRES. Também ALVAREZ V. et al. (s.d.) verificaram que os solos arenosos apresentavam valores de SSOL e SRES inferiores aos argilosos.

A forma de S que apresentou menor incremento com a aplicação de S foi o SRES e, nos solos mais arenosos,  $PV_a$  e  $AQ_a$ , pode-se dizer que, praticamente, não houve variação no seu teor, o que discorda do trabalho de

DIAS (1992) que constatou maiores aumentos nessa forma de S no solo arenoso. Esse resultado sugere que nos solos arenosos o S adicionado deve permanecer em formas mais solúveis e, portanto, mais facilmente extraíveis, que nos solos argilosos. O SRES representa uma parte considerável do S-orgânico (BARDSLEY e LANCASTER, 1960). Por constituir-se num 'pool' preferencialmente orgânico, provavelmente, alocou menor porção do S adicionado. Todavia, conforme salientado por DIAS (1992), as formas de S não são compartimentos estanques com limites claramente definidos, assim, com a metodologia utilizada, é praticamente impossível fracionar quantitativamente o S aplicado, ainda mais porque, em virtude das condições favoráveis de umidade, pH, temperatura e nutrientes durante o experimento, não se pode excluir a possibilidade de mineralização de formas orgânicas de S. Segundo TABATABAI e AL-KHAFAJI (1980), a mineralização do S orgânico pode variar de 2 a 14 mg/kg/mês de S, dependendo da temperatura e do teor de matéria orgânica do solo. Similarmente, Zhu et al., citados por FRENEY (1986), observaram para diferentes solos taxas de 3,8 a 15,6 % do S orgânico mineralizados em um período de 10 semanas.

Com relação ao S disponível, observa-se que o extrator  $\text{NH}_4\text{OAc}$  em  $\text{HOAc}$  recuperou maiores quantidades de S que os outros dois extratores (Quadro 2), tendência também observada por DIAS (1992), o que se deve provavelmente à extração de maior quantidade do S orgânico em relação ao  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em  $\text{H}_2\text{O}$  ou em  $\text{HOAc}$ . SINGH e SARKAR (1996) sugeriram que extratores com acetato, como o  $\text{NH}_4\text{OAc}$  e o reagente de Morgan, são capazes de extrair além do S solúvel e frações do adsorvido, porções do S orgânico. No caso do  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em  $\text{HOAc}$ , o efeito do acetato em solubilizar a matéria orgânica deve ter sido parcialmente neutralizado pelo efeito do cálcio na manutenção da estabilidade dos complexos organo-argilosos do solo. WATKINSON e KEAR (1994), estudando métodos para avaliar o S orgânico mineralizável, observaram que soluções de cálcio (fosfato de cálcio) precipitam ou evitam a extração do S orgânico do solo. Além disso, DIAS (1992) observou que o S extraído com  $\text{NH}_4\text{OAc}$  e  $\text{HOAc}$  se correlacionou melhor com a movimentação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  associado ao  $\text{SO}_4^{2-}$  em colunas de solos comparativamente ao extraído com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em  $\text{HOAc}$  ou  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol/L.

Nos solos mais argilosos, constataram-se maiores diferenças entre as quantidades recuperadas pelos extratores, enquanto, naqueles mais arenosos ( $PV_a$  e  $AQ_a$ ) a capacidade de extração dos três extratores, especialmente nas duas maiores doses, mostrou-se praticamente igual. Isso, possivelmente, deve-se à baixa capacidade tampão dos solos arenosos, onde todo ou grande parte do S adicionado permanece em formas solúveis.

Modelos curvilíneos, quadráticos e raiz-quadráticos mostraram-se mais adequados para expressar a recuperação do S aplicado pelos três extratores (Quadro 3). Isso reflete bem o fato de que a capacidade tampão não é uma propriedade constante do solo, uma vez que varia com a reserva lábil do nutriente no solo. Similarmente, para o SSOL e SRES, em geral, os modelos curvilíneos também apresentaram maiores graus de ajuste e significância de seus coeficientes (Quadro 4).

A declividade do S recuperado em função do S adicionado ( $\Delta Srp / \Delta Sad$ ) permite estimar a dose desse nutriente a ser adicionada ao solo para que haja um determinado incremento na sua disponibilidade, ou seja, pode indicar as quantidades de S necessárias para se alcançar o nível crítico.

Uma vez que equações curvilíneas apresentam declividades variáveis de acordo com o valor da variável independente, para fins de comparação entre solos, foi escolhida a declividade ( $\Delta Srp / \Delta Sad$ ) na dose recomendável (90 % da produção máxima), em virtude de sua melhor correlação com características químicas e físicas dos solos em relação às declividades na dose zero e no intervalo entre o zero e a dose recomendável (Quadro 5). Para os três extratores, verificou-se uma ampla variação nos valores de declividades ( $\Delta Srp / \Delta Sad$ ), entretanto, apenas aquelas obtidas pelo  $Ca(H_2PO_4)_2$  em HOAc mostraram-se bem correlacionadas com as características dos solos que refletem a capacidade tampão (Quadro 5). Verificaram-se correlações positivas com o teor de P remanescente ( $r = 0,914^{***}$ ) e negativas com o teor de argila ( $r = -0,822^{**}$ ) e com o equivalente de umidade ( $r = -0,807^{**}$ ), evidenciando a grande sensibilidade do  $Ca(H_2PO_4)_2$  em HOAc à capacidade tampão dos solos. Isto significa que em solos argilosos a recuperação do S aplicado é menor do que nos arenosos, em razão de seu poder de extração ser exaurido pelo próprio solo, à medida que aumenta o teor de argila. Similarmente, em trabalho com sorgo (FONTES et al., 1982ab) e eucalipto

Quadro 3 - Equações do enxofre disponível em NH<sub>4</sub>OAc 0,5 mol/L em HOAc 0,25 mol/L (AM-Ac), em Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em H<sub>2</sub>O (FM-Aa) e em Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em HOAc 2mol/L (FM-Ac), em mg/dm<sup>3</sup>, obtidos antes do cultivo das plantas de café, em função das doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de diferentes solos

Extrator	Solo	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
AM-Ac	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 34,14 + 0,462^{**} S$	0,991
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 36,38 + 0,582^{**} S - 0,0006^{**} S^2$	0,993
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 4,67 + 0,357^{**} S + 0,0013^{**} S^2$	0,998
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 1,67 - 1,152^{**} S^{0,5} + 0,5360^{**} S$	0,999
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 8,64 + 1,922^{**} S^{0,5} + 0,4420^{**} S$	0,997
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 6,10 + 0,502^{**} S + 0,0005^{**} S^2$	0,996
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = 3,74 + 0,793^{**} S - 0,0023^{**} S^2$	0,982
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 6,25 + 0,791^{**} S - 0,0014^{**} S^2$	0,996
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 7,20 + 0,731^{**} S - 0,0011^{**} S^2$	0,998
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 10,73 + 0,672^{**} S$	0,987
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 11,54 + 0,865^{**} S$	0,996
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = 9,52 + 0,897^{**} S$	0,994
	FM-Aa	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 5,93 - 2,871^{**} S^{0,5} + 0,8290^{**} S$
LVh <sub>b</sub> - MAN		$\hat{Y}^c = 5,97 + 0,560^{**} S$	0,997
LV <sub>a</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = -0,32 + 0,651^{**} S - 0,0023^{**} S^2$	0,994
LV <sub>b</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = 1,26 + 0,339^{**} S - 0,0006^{*} S^2$	0,979
LR <sub>a</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 5,65 + 0,309^{**} S$	0,988
LR <sub>b</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 5,04 + 0,229^{**} S$	0,997
LR <sub>a</sub> - LAV		$\hat{Y}^c = -0,27 + 0,506^{**} S$	0,994
LE <sub>1a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 1,33 - 1,427^{**} S^{0,5} + 0,450^{**} S$	0,996
LE <sub>2a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 8,31 + 0,361^{**} S$	0,991
LU <sub>a</sub> - VIC		$\hat{Y}^c = 1,44 - 2,613^{**} S^{0,5} + 0,817^{**} S$	0,992
PV <sub>a</sub> - PTN		$\hat{Y}^c = 3,92 + 0,869^{**} S$	0,997
AQ <sub>a</sub> - MTS		$\hat{Y}^c = 5,78 + 0,969^{**} S$	0,996
FM-Ac		LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 10,25 - 1,443^{**} S^{0,5} + 0,6460^{**} S$
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 10,65 - 2,968^{**} S^{0,5} + 0,6880^{**} S$	0,987
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 1,21 - 1,104^{**} S^{0,5} + 0,2950^{**} S$	0,996
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 0,89 - 0,004 S + 0,0006^{*} S^2$	0,997
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 5,69 + 0,114^{**} S + 0,0009^{**} S^2$	0,990
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 1,45 + 0,089^{*} S - 0,0017^{*} S^2 + 0,00002^{**} S^3$	0,999
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = 2,38 + 0,339^{**} S$	0,987
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 3,32 + 0,289^{**} S$	0,997
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 3,06 + 0,115^{*} S + 0,0024^{**} S^2$	0,998
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 3,20 + 0,230^{**} S + 0,0030^{**} S^2$	0,998
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 6,61 - 3,285^{**} S^{0,5} + 1,1710^{**} S$	0,978
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = 10,72 + 0,676^{**} S + 0,0027^{**} S^2$	0,993

\* e \*\*: Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

Quadro 4 - Equações do enxofre do solo (SSOL) e enxofre de reserva (SRES), em mg/dm<sup>3</sup>, obtidos antes do cultivo das plantas de café, em função das doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de diferentes solos

Forma de S	Solo	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
SSOL	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y} = 293,80 + 0,091 S + 0,0052^{**} S^2$	0,996
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y} = 241,89 + 2,236^{**} S^{0,5} + 0,652^{**} S$	0,981
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y} = 92,24 + 0,396^{**} S + 0,0032^{**} S^2$	0,994
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y} = 49,34 + 0,195^{**} S + 0,0040^{**} S^2$	0,994
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y} = 65,82 + 1,027^{**} S - 0,0015^* S^2$	0,999
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y} = 62,61 - 0,206^{**} S + 0,0076^{**} S^2$	0,979
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y} = 134,01 + 1,002^{**} S - 0,0021^{**} S^2$	0,996
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y} = 85,42 + 0,962^{**} S - 0,0015^* S^2$	0,992
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y} = 80,50 + 1,120^{**} S$	0,995
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y} = 189,37 + 0,912^{**} S + 0,0021^* S^2$	0,994
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y} = 145,44 + 0,939^{**} S$	0,996
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y} = 49,48 + 0,708^{**} S + 0,0033^* S^2$	0,999
SRES	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y} = 260,75 - 0,434^{**} S + 0,0057^{**} S^2$	0,960
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y} = 208,89 + 0,324^{**} S$	0,848
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y} = 87,57 + 0,038 S + 0,0019^{**} S^2$	0,964
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y} = 48,77 + 0,174^* S + 0,0034^{**} S^2$	0,953
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y} = 55,86 + 0,252^{**} S$	0,951
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y} = 57,14 - 0,726^{**} S + 0,0072^{**} S^2$	0,930
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y} = 129,85 + 0,238^{**} S$	0,843
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y} = 79,34 + 0,159^{**} S$	0,714
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y} = 71,92 + 0,502^{**} S$	0,977
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y} = 179,98 + 0,128 S + 0,0032^{**} S^2$	0,924
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y} = 133,90 + 0,074^* S$	0,773
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y} = 37,44 + 0,072^* S$	0,531

\* e \*\*: Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

(ALVAREZ V. et al., 1983) também foram encontradas estreitas correlações do S extraído por esse extrator e a capacidade tampão de sulfatos dos solos.

A estreita correlação possibilitou estabelecer equações lineares entre a declividade do S recuperado pelo  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc com a adição de S ( $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad}$ ) em função do teor de P remanescente:  $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad} = 0,041 + 0,017^{***}\text{Prem}$  ( $R^2 = 0,836$ ); em função do teor de argila:  $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad} = 0,759 - 0,0085^{**} \text{Arg}$  ( $R^2 = 0,675$ ); e também como função do equivalente de umidade:  $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad} = 0,854 - 2,401^{**} \text{EU}$  ( $R^2 = 0,651$ ).

### 3.2. Resposta do cafeeiro à aplicação de enxofre no solo

Com exceção das amostras de solo de Manhuaçu, pode-se afirmar que, no geral, a produção de matéria seca de folhas, caule e raízes e especialmente da parte aérea do cafeeiro aumentaram com as doses de S aplicadas (Quadro 6).

Similarmente ao que ocorre sob deficiência de N, a deficiência de S também tende a deprimir o crescimento da parte aérea em favor do crescimento das raízes, o que induz uma redução na razão parte aérea/ raiz (MARSCHNER, 1995). O mesmo autor cita um trabalho de Edelbauer (1980) onde foi constatado um decréscimo na razão parte aérea/ raiz, em termos de massa de matéria seca, de 4,4 para 2,0 em plantas de tomate deficientes em S. No presente trabalho, não foi possível observar nenhuma tendência inequívoca quanto a esta razão entre as doses de S (Quadro 6), o que pode ser devido à dificuldade na remoção da totalidade de raízes em experimentos com solos.

Entretanto, quando se compara a razão parte aérea/raiz entre solos, verifica-se uma diferença marcante (Quadro 6). Tanto a raiz quanto a parte aérea do cafeeiro cultivado na areia quartzosa de Monte Santo apresentaram menores crescimentos em relação às plantas cultivadas nos solos mais argilosos. A razão parte aérea/raiz do cafeeiro nos solos argilosos situou-se em torno de 2,0, enquanto nas amostras PTN e MTS (22 e 6 % de argila respectivamente) encontrou-se próximo de 3,0. Essa maior razão parte aérea/raiz originou-se de um menor desenvolvimento das raízes, o que,

Quadro 6 - Produção de matéria seca de folhas indicadoras, novas e maduras, caule, parte aérea e raiz de plantas de café, cultivar Catuaí, doze meses após o transplante, em função de doses de S aplicadas em amostras de diferentes solos

Solos	Dose	----- Folhas -----			Caule	P. Aérea	Raiz	Razão PA/Raiz
	S	Indicadoras	Novas	Maduras				
	mg/dm <sup>3</sup>	----- g/vaso -----						
LV <sub>h</sub> <sub>a</sub> - MAN	0	12,61	9,73	21,80	39,53	83,66	46,05	1,8
	14	12,88	11,80	19,93	35,48	80,09	41,71	1,9
	28	12,71	12,98	21,71	36,42	83,82	39,10	2,1
	56	13,00	12,76	20,78	38,43	84,97	45,24	1,9
	84	13,84	11,91	19,31	33,23	78,29	38,78	2,0
	140	10,05	11,98	20,26	32,45	74,74	38,86	1,9
LV <sub>h</sub> <sub>b</sub> - MAN	0	8,58	9,21	13,44	28,14	59,37	33,39	1,8
	14	9,28	8,80	15,46	29,92	63,46	37,76	1,7
	28	9,31	9,45	13,36	27,47	59,59	34,17	1,7
	56	7,79	9,39	13,00	26,35	56,53	35,42	1,6
	84	9,69	9,15	13,97	29,20	62,01	33,31	1,9
	140	8,67	8,55	14,46	29,82	61,50	37,99	1,6
LV <sub>a</sub> - PAT	0	5,53	6,68	7,59	9,20	29,00	14,61	2,0
	12	9,93	10,11	12,63	25,26	57,93	32,67	1,8
	24	11,16	12,00	13,39	29,36	65,91	32,69	2,0
	48	11,03	11,68	14,73	31,55	68,99	30,43	2,3
	72	11,67	12,21	14,65	33,15	71,68	38,10	1,9
	120	12,64	11,92	13,17	30,97	68,69	33,24	2,1
LV <sub>b</sub> - PAT	0	3,71	3,33	4,11	4,51	15,65	7,19	2,2
	14	6,27	7,94	8,52	17,37	40,10	21,15	1,9
	28	7,28	8,11	9,87	18,63	43,89	19,40	2,3
	56	8,28	9,20	9,32	19,92	46,72	21,01	2,2
	84	9,26	10,24	9,27	24,36	53,14	21,45	2,5
	140	9,80	12,13	10,41	24,56	56,89	20,84	2,7
LR <sub>a</sub> - SSP	0	11,47	10,42	15,60	29,27	66,76	30,16	2,2
	12	12,71	10,50	17,36	29,79	70,36	31,17	2,3
	24	13,41	11,46	17,42	32,61	74,90	39,99	1,9
	48	13,32	12,36	17,40	32,97	76,05	39,38	1,9
	72	13,62	11,67	17,25	32,21	74,75	36,64	2,0
	120	11,35	10,78	17,35	33,76	73,24	35,58	2,1
LR <sub>b</sub> - SSP	0	6,80	7,85	7,41	18,12	40,18	20,42	2,0
	14	6,32	10,48	8,38	19,05	44,22	20,13	2,2
	28	7,44	9,96	8,81	19,30	45,51	20,00	2,3
	56	8,48	10,60	7,74	21,03	47,85	23,58	2,0
	84	9,21	10,92	9,23	22,27	51,62	23,20	2,2
	140	7,10	9,03	8,02	17,13	41,29	18,46	2,2

a e b : Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

Quadro 6, Cont.

Solos	Dose	----- Folhas -----			Caule	P. Aérea	Raiz	Razão PA/Raiz
	S	Indicadoras	Novas	Maduras				
	mg/dm <sup>3</sup>	----- g/vaso -----						
LR <sub>a</sub> - LAV	0	11,63	11,64	13,86	26,76	63,88	31,64	2,0
	12	12,09	11,16	14,65	28,25	66,15	35,78	1,8
	24	12,83	11,91	14,78	33,65	73,17	38,52	1,9
	48	12,74	12,71	14,52	32,41	72,38	38,94	1,9
	72	11,75	11,07	17,24	32,63	72,70	38,05	1,9
	120	10,59	12,79	15,05	30,77	69,19	31,69	2,2
LE <sub>1a</sub> - MAC	0	9,42	8,22	11,15	24,18	52,97	33,63	1,6
	12	9,95	9,49	11,29	25,83	56,55	35,63	1,6
	24	11,16	9,72	11,43	27,32	59,63	36,03	1,7
	48	8,60	10,36	14,40	28,30	61,67	38,12	1,6
	72	10,42	8,80	13,19	30,72	63,14	42,94	1,5
	120	10,14	8,86	15,56	26,87	61,43	29,06	2,1
LE <sub>2a</sub> - MAC	0	10,27	10,40	13,22	24,94	58,83	35,51	1,7
	10	11,00	11,15	13,97	26,28	62,40	35,86	1,7
	20	10,27	10,29	16,35	31,70	68,62	40,04	1,7
	40	11,92	11,17	15,52	29,91	68,52	34,04	2,0
	60	12,20	11,30	14,37	27,71	65,58	32,11	2,0
	100	9,50	11,96	14,00	27,03	62,49	29,22	2,1
LU <sub>a</sub> - VIC	0	11,76	11,74	13,91	22,46	59,87	30,71	1,9
	10	12,64	11,42	16,13	30,50	70,69	36,35	1,9
	20	14,69	12,17	15,37	31,57	73,79	38,34	1,9
	40	13,95	11,88	15,54	27,44	68,81	35,03	2,0
	60	14,64	12,54	14,26	28,53	69,96	35,40	2,0
	100	12,16	11,24	14,26	27,35	65,01	29,57	2,2
PV <sub>a</sub> - PTN	0	8,99	9,71	8,47	19,63	46,80	15,10	3,1
	8	9,43	10,06	9,41	20,44	49,35	17,35	2,8
	16	12,25	11,39	13,99	22,83	60,46	23,71	2,5
	32	12,10	11,99	13,76	25,57	63,41	23,68	2,7
	48	9,40	10,31	11,61	22,49	53,80	19,61	2,7
	80	9,41	10,34	11,29	20,02	51,06	18,28	2,8
AQ <sub>a</sub> - MTS	0	4,88	5,42	6,02	4,97	21,29	4,70	4,5
	8	7,21	7,42	7,15	7,70	29,48	10,58	2,8
	16	6,80	7,93	6,75	7,56	29,04	11,27	2,6
	32	8,11	8,30	6,36	8,63	31,40	10,34	3,0
	48	7,18	7,62	7,40	8,83	31,02	10,38	3,0
	80	7,25	7,88	8,26	8,68	32,08	8,62	3,7

a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

provavelmente, acarretou uma redução no crescimento da parte aérea das plantas cultivadas nos solos arenosos, especialmente na amostra MTS. Similarmente, FONTES (1979), em estudo de correlação e calibração de S, também observou menor crescimento do sorgo no solo arenoso (11 % de argila). Esse resultado parece um tanto contraditório, uma vez que, na realidade, em condições de suprimento adequado de água e nutrientes, esperar-se-ia um maior crescimento da planta, como um todo, no solo de textura mais arenosa, onde os nutrientes adicionados permanecem em condições de maior disponibilidade em relação aos argilosos. Para o P esse fato já foi demonstrado em ensaio com soja feito por VILLANI et al. (1990) e, segundo NOVAIS et al. (1995), os solos de textura média e os arenosos são em geral mais produtivos que os argilosos quase que independentemente da quantidade inicial de P do solo.

Tanto nesse ensaio quanto no trabalho de FONTES (1979), coincidentemente, as amostras de textura arenosa, onde houve menor crescimento das plantas, foram aqueles solos mais pobres em matéria orgânica (Quadro 1), o que sugere a importância da mineralização do S orgânico na determinação da disponibilidade de S. Em solos do Mississippi, verificou-se que, em média, 4 e 6 % do S orgânico foi mineralizado após 3 e 6 meses de incubação, perfazendo um total de 5 a 26 kg/ha de S que se tornou disponível no período de 6 meses (NELSON, 1964). Portanto, segundo KAMPRATH e JONES (1986), a mineralização do S orgânico pode ser uma importante fonte de S disponível para as plantas em solos com teores relativamente altos de matéria orgânica.

Outra possível razão para o menor crescimento das plantas no solo de textura arenosa poderia ser a presença de algum impedimento físico, compactação, ocasionado pela manipulação das amostras na montagem do experimento, o que restringiria o crescimento radicular com conseqüente redução no crescimento da parte aérea.

As equações quadráticas ou raiz quadráticas foram as que melhor se ajustaram a produção de matéria seca das folhas, caules, parte aérea e das raízes em função do enxofre aplicado (Quadros 7 e 8). A falta de resposta, em termos de crescimento da parte aérea e da raiz do cafeeiro, nas duas amostras provenientes de Manhauçu, deveu-se provavelmente aos altos teores de

Quadro 7 - Equações da produção de matéria seca das folhas indicadoras (MSFI), novas (MSFN) e maduras (MSFM), de plantas de café, cultivar Catuaí, em g/vaso, em função das doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de diferentes solos

Variável	Solo	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
MSFI	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 12,28 + 0,045^* S - 0,0004^{**} S^2$	0,852
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 8,89$	
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 5,79 + 1,295^{**} S^{0,5} - 0,0640^{**} S$	0,957
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 4,37 + 0,098^{**} S - 0,0004^{**} S^2$	0,951
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 11,75 + 0,069^{**} S - 0,0006^{**} S^2$	0,925
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 6,16 + 0,065^{**} S - 0,0004^{**} S^2$	0,803
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = 11,53 + 0,484^0 S^{0,5} - 0,0520^* S$	0,875
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 9,95$	
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 9,99 + 0,079^{**} S - 0,0008^{**} S^2$	0,760
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 11,96 + 0,107^{**} S - 0,0011^{**} S^2$	0,817
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 8,76 + 1,040^{**} S^{0,5} - 0,1110^{**} S$	0,478
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = 4,95 + 0,860^{**} S^{0,5} - 0,0690^* S$	0,858
	MSFN	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = 9,79 + 0,775^{**} S^{0,5} - 0,0520^{**} S$
LVh <sub>b</sub> - MAN		$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 9,09$	
LV <sub>a</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = 6,71 + 1,322^{**} S^{0,5} - 0,0780^{**} S$	0,968
LV <sub>b</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = 4,85 + 0,106^{**} S - 0,0004^{**} S^2$	0,859
LR <sub>a</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 10,28 + 0,055^* S - 0,0004^* S^2$	0,834
LR <sub>b</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 7,85 + 0,832^{**} S^{0,5} - 0,0610^{**} S$	0,879
LR <sub>a</sub> - LAV		$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 11,88$	
LE <sub>1a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 8,24 + 0,523^* S^{0,5} - 0,0440^* S$	0,681
LE <sub>2a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 10,50 + 0,014^0 S$	0,722
LU <sub>a</sub> - VIC		$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 11,83$	
PV <sub>a</sub> - PTN		$\hat{Y}^c = 9,54 + 0,626^* S^{0,5} - 0,061^0 S$	0,506
AQ <sub>a</sub> - MTS		$\hat{Y}^c = 5,49 + 0,844^{**} S^{0,5} - 0,067^* S$	0,932
MSFM		LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 20,63$
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 13,95$	
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 7,56 + 1,855^{**} S^{0,5} - 0,1220^{**} S$	0,995
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 4,44 + 1,209^{**} S^{0,5} - 0,0637^{**} S$	0,905
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 15,73 + 0,492^0 S^{0,5} - 0,0330 S^2$	0,898
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 8,28$	
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 15,02$	
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 11,09 + 0,038^{**} S$	0,826
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 13,09 + 0,822^* S^{0,5} - 0,0750^* S$	0,712
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 14,18 + 0,556^0 S^{0,5} - 0,0570^0 S$	0,579
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 8,04 + 1,660^{**} S^{0,5} - 0,1460^{**} S$	0,623
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = 6,30 + 0,022^0 S$	0,691

o,\* e \*\*: Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente;  
a e b : Profundidades 0-20 e 40 -60 cm, respectivamente.

Quadro 8 - Equações da produção de matéria seca do caule (MSCA), da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSRA), de plantas de café, cultivar Catuaí, em g/vaso, em função das doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de diferentes solos

Variável	Solo	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
MSCA	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 35,92$	
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 28,48$	
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 9,37 + 5,655^{**} S^{0,5} - 0,3375^{**} S$	0,998
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 5,05 + 3,366^{**} S^{0,5} - 0,1467^{**} S$	0,968
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 31,77$	
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 17,60 + 0,114^0 S - 0,0008^* S^2$	0,887
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = 26,23 + 1,672^* S^{0,5} - 0,1121^* S$	0,730
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 23,98 + 0,169^* S - 0,0012^* S^2$	0,925
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 24,65 + 1,670^* S^{0,5} - 0,1434^0 S$	0,671
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 23,18 + 2,670^{**} S^{0,5} - 0,2490^{**} S$	0,783
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 19,54 + 0,234^* S - 0,0030^* S^2$	0,764
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 8,30$	
	MSPA	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 80,93$
LVh <sub>b</sub> - MAN		$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 60,41$	
LV <sub>a</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = 29,44 + 10,128^{**} S^{0,5} - 0,6020^{**} S$	0,996
LV <sub>b</sub> - PAT		$\hat{Y}^c = 17,15 + 6,153^{**} S^{0,5} - 0,2505^{**} S$	0,967
LR <sub>a</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 67,88 + 0,241^* S - 0,0017^0 S^2$	0,839
LR <sub>b</sub> - SSP		$\hat{Y}^c = 40,03 + 0,273^{**} S - 0,0019^{**} S^2$	0,920
LR <sub>a</sub> - LAV		$\hat{Y}^c = 64,50 + 0,273^* S - 0,0020^* S^2$	0,807
LE <sub>1a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 53,53 + 0,254^* S - 0,0016^0 S^2$	0,979
LE <sub>2a</sub> - MAC		$\hat{Y}^c = 60,29 + 0,304^* S - 0,0029^* S^2$	0,800
LU <sub>a</sub> - VIC		$\hat{Y}^c = 60,36 + 4,400^{**} S^{0,5} - 0,4134^{**} S$	0,902
PV <sub>a</sub> - PTN		$\hat{Y}^c = 47,99 + 0,592^{**} S - 0,0071^{**} S^2$	0,588
AQ <sub>a</sub> - MTS		$\hat{Y}^c = 21,73 + 2,740^0 S^{0,5} - 0,1831 S$	0,950
MSRA		LVh <sub>a</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 41,62$
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\hat{Y}^c = \bar{Y} = 35,34$	
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 15,65 + 5,018^{**} S^{0,5} - 0,3130^{**} S$	0,869
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\hat{Y}^c = 8,14 + 3,397^{**} S^{0,5} - 0,2025^{**} S$	0,906
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 30,69 + 0,256^{**} S - 0,0019^{**} S^2$	0,620
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\hat{Y}^c = 19,16 + 0,123^* S - 0,0010^* S^2$	0,810
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\hat{Y}^c = 32,76 + 0,228^{**} S - 0,0020^{**} S^2$	0,919
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 31,98 + 0,310^{**} S - 0,0027^{**} S^2$	0,608
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\hat{Y}^c = 37,56 - 0,081^{**} S$	0,894
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\hat{Y}^c = 30,81 + 2,690^{**} S^{0,5} - 0,2820^{**} S$	0,930
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\hat{Y}^c = 14,48 + 2,870^{**} S^{0,5} - 0,2750^{**} S$	0,672
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\hat{Y}^c = 5,01 + 2,350^* S^{0,5} - 0,2220^* S$	0,943

o,\* e \*\*: Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.  
a e b : Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

matéria orgânica (Quadro 1) e de S disponível naturalmente presentes (LVh<sub>a</sub> apresentou 11 e 34 mg/dm<sup>3</sup> de S e LVh<sub>b</sub> 10 e 37 mg/dm<sup>3</sup> de S extraídos com Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc e NH<sub>4</sub>OAc em HOAc, respectivamente).

A partir das equações ajustadas para a parte aérea, estimaram-se as produções correspondentes a 90 % do máximo e as doses de S necessárias para alcançá-las (doses recomendáveis), doses que, em casa de vegetação, podem representar a máxima eficiência econômica (ALVAREZ V. e DIAS, 1996). Pela substituição das doses recomendáveis nas equações de regressão que relacionam os teores de S no solo com as doses de S adicionadas (Quadro 3), foram obtidos os níveis críticos deste nutriente no solo.

### 3.3. Níveis críticos de enxofre no solo

Ampla variação dos níveis críticos foi observada entre os vários solos estudados (Quadro 9), numa amplitude de 9,76 a 23,86 para o NH<sub>4</sub>OAc em HOAc, de 3,02 a 20,79 para o Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em H<sub>2</sub>O e 2,65 a 18,43 mg/dm<sup>3</sup> de S para o Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc. Com relação ao Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc, variações semelhantes foram encontradas para sorgo (FONTES et al., 1982b) e para eucalipto (ALVAREZ et al., 1983) onde foi mostrado que essas variações são influenciadas pelas características do solo relacionadas à capacidade tampão de sulfatos.

Diante dessa ampla variação do valor do nível crítico com o solo, foram calculadas correlações entre esses valores e algumas características do solo (Quadro 10). Verificou-se que, apenas os níveis críticos obtidos pelo Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc correlacionaram-se bem com essas características do solo, P remanescente ( $r = 0,896^{***}$ ), argila ( $r = - 0,852^{***}$ ) e equivalente de umidade ( $r = - 0,898^{***}$ ). Com relação aos níveis críticos obtidos pelo NH<sub>4</sub>OAc em HOAc cabe chamar a atenção para a sua correlação com o teor de matéria orgânica do solo ( $r = 0,678^{**}$ ), correlação não tão estreita, porém altamente significativa. SUBBA RAO e GANESHAMURTHY (1994), trabalhando com 97 amostras superficiais (0-15 cm) de diferentes solos, também observaram que o S extraído em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol/L correlacionou-se positiva e significativamente ( $r = 0,62$ ) com os teores de carbono orgânico.

Quadro 9 - Doses recomendáveis (DRS) e níveis críticos de S disponível pelos extratores  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L em  $\text{HOAc}$  0,25 mol/L (AM-Ac),  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) e  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{HOAc}$  2mol/L (FM-Ac), obtidos para a matéria seca da parte aérea de plantas de café, cultivar Catuai

SOLO	DRS	AM-Ac	FM-Aa	FM-Ac
	----- mg/dm <sup>3</sup> -----			
LV <sub>a</sub> - PAT	25	14,20	14,27	3,10
LV <sub>b</sub> - PAT	58	23,86	20,79	2,65
LR <sub>a</sub> - SSP	5	14,66	7,02	6,26
LR <sub>b</sub> - SSP	21	16,66	9,76	2,75
LR <sub>a</sub> - LAV	8	9,76	3,66	5,02
LE <sub>1a</sub> - MAC	17	19,08	3,02	8,15
LE <sub>2a</sub> - MAC	6	11,25	10,32	3,80
LU <sub>a</sub> - VIC	2	11,60	3,36	3,51
PV <sub>a</sub> - PTN	13	22,40	14,80	9,70
AQ <sub>a</sub> - MTS	11	19,33	16,27	18,43

a e b - Profundidades 0 - 20 e 40 - 60 cm, respectivamente.

Quadro 10 - Coeficientes de correlação linear dos níveis críticos de S, em mg/dm<sup>3</sup>, avaliados pelos extratores  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L em  $\text{HOAc}$  0,25 mol/L,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{HOAc}$  2mol/L com algumas características dos solos

Característica	Níveis Críticos		
	$\text{NH}_4\text{OAc} \cdot \text{HOAc}$	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{HOAc}$
Teor argila (%)	-0,474 <sup>o</sup>	-0,287	-0,852***
P rem. (mg/L)	0,236	0,278	0,896***
Eq. Umidade (kg/kg)	-0,300	-0,166	-0,898***
M. orgânica (dag/kg)	-0,678**	-0,514 <sup>o</sup>	-0,529 <sup>o</sup>
Dens. Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,282	0,220	0,763**

<sup>o</sup>, \*, \*\* e \*\*\*: Significativos a 10, 5, 1 e 0,1% de probabilidade, respectivamente.

Uma vez que o nível crítico de S extraído pelo  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc variou com as características do solo, equações foram ajustadas para expressar esse relacionamento. Assim, a relação do nível crítico de S como função do teor de P remanescente é, **NíCrí S = 1,53 + 0,321\*\*\* Prem** ( $R^2 = 0,803$ ); do teor de argila, **NíCrí S = 15,86 - 0,1725\*\*\*Arg** ( $R^2 = 0,725$ ) e, do equivalente de umidade, **NíCrí S = 18,65 - 52,44\*\*\*EU** ( $R^2 = 0,807$ ).

De posse dessas equações mais aquelas que relacionam as variações nas declividades do S recuperado pelo  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc de acordo com o adicionado em função das características do solo é possível calcular a quantidade de S a ser aplicada no solo para se atingir o nível crítico. Assim, para uma dada amostra de solo, conhecendo-se seus teores de S disponível em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc e de P remanescente ou de argila ou o equivalente de umidade, pode-se recomendar a adubação com S para o cafeeiro arábica cultivar Catuaí vermelho de até 12 meses de idade mediante a seguinte fórmula: **Dose recomendável = (NíCrí - S disponível) /  $\Delta$  Srp /  $\Delta$  Sad.**

Como exemplo, pode -se supor um solo que apresente 10 mg/ L de Prem e 2,5 mg/dm<sup>3</sup> de S disponível em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc. Substituindo esses valores nas equações pertinentes, obtém-se a dose recomendável de 10,7 mg/dm<sup>3</sup> de S. Para a produção de mudas de eucalipto (ALVAREZ V. et al., 1983), utilizando-se o mesmo solo hipotético, a dose a ser aplicada seria de 34 mg/dm<sup>3</sup> de S. Essa diferença pode ser explicada pela maior exigência e taxa de crescimento inicial da planta de eucalipto em relação ao cafeeiro.

### 3.4. Formas de enxofre e níveis críticos na planta

Dentre as partes da planta, o caule mais ramos apresentaram os menores teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> (Quadros 11 e 12). Similarmente, em trabalho de MALAVOLTA (1983), foi mostrado que o conteúdo e teor de S total do tronco e dos ramos da árvore de café com 10 anos de idade representava uma pequena fração (> 50 %) da quantidade encontrada nas folhas. Em outro ensaio com o cultivar Catuaí de 3, 4, 5 e 6 anos de idade, HAAG (1987) observou que o teor de macronutrientes no caule e nos ramos era aproximadamente 40 % do teor dos nutrientes na folha.

Doze meses após o transplântio, por ocasião do corte das plantas, observou-se que, entre os solos onde houve resposta à adição de S, somente nas amostras de Patrocínio (LV<sub>a</sub> e LV<sub>b</sub>), as plantas de café cultivadas sem aplicação do nutriente, mostravam-se inteiramente cloróticas, o que pode ser devido aos baixos teores de S disponível nesses solos (Quadro 2). Nos outros solos, na ausência de S adicionado, as plantas encontravam-se amarelecidas apenas na parte superior (folhas novas).

Embora os sintomas visuais de deficiência de S no cafeeiro apresentem-se inicialmente nas folhas mais novas (CARVAJAL, 1984), fato comprovado também neste ensaio, as folhas maduras apresentaram, em média, teores de S total e de sulfato inferiores aos das folhas indicadoras e novas (Quadros 11 e 12). Diferentemente, FRENEY et al. (1978) observaram que as folhas maduras de trigo apresentavam menores teores de S total e maiores de S-SO<sub>4</sub> do que as folhas jovens. Esse resultado mostra-se um tanto intrigante porque, como se sabe, na mobilização secundária do S, o sulfato, principal forma de reserva do nutriente na planta, é o primeiro a ser translocado das folhas maduras para os órgãos que se encontram em fase de crescimento.

O S é considerado um elemento de alta mobilidade no floema (MARSCHNER, 1995), portanto, a baixa concentração desse nutriente nas folhas maduras do cafeeiro sugere a ocorrência de considerável redistribuição de S dessas folhas para outras partes da planta em crescimento.

Não apenas no cafeeiro, mas, em muitas espécies, os sintomas de deficiência de S ocorrem primeiramente nas folhas jovens, muito embora, o S seja classificado como um elemento móvel na planta. Por outro lado, em outras espécies, folhas novas e maduras tornam-se cloróticas simultaneamente, ou até mesmo a clorose manifesta-se inicialmente nas folhas maduras, similarmente ao que ocorre sob deficiência de N (SALISBURY e ROSS, 1992). De acordo com os autores haveria diferenças quanto à facilidade de remobilização de S entre as espécies, de tal forma que a sua deficiência seria notada primeiramente nas folhas jovens daquelas espécies que apresentassem uma certa dificuldade na redistribuição do S dos tecidos maduros. Todavia, parece que a capacidade de redistribuí-lo não é uma característica da espécie, mas um processo que depende do suprimento de N. Segundo ROBSON e PITMAN (1983), em condições de adequado suprimento de N, os sintomas de

deficiência de S ocorrem nas folhas jovens e, sob baixa disponibilidade de N, aparecem nas folhas mais velhas, indicando que a extensão da remobilização do S das folhas maduras depende sobretudo do grau de senescência foliar induzida pela deficiência de N.

Em todos os solos, inclusive nas amostras de Manhuaçu, onde não houve resposta em termos de produção de matéria seca, o aumento da dose de S ocasionou, em geral, grandes aumentos na concentração de S-SO<sub>4</sub> da planta (Quadros 12 e 13). O efeito da aplicação do S sobre o teor de sulfato (Quadro 12) foi mais acentuado do que aquele observado sobre o teor de S total (Quadro 11), similarmente aos resultados apresentados por FRENEY et al. (1978) em plantas de trigo. Assim, devido a sua grande sensibilidade à aplicação de S é que o S solúvel é considerado por SCAIFE e BURNS (1986) como o índice mais adequado para diagnosticar deficiências de S. No entanto, em contrapartida, há maior variabilidade na medição do S-SO<sub>4</sub> do que na do S total (JONES, 1986; PINKERTON e RANDALL, 1995).

Ao contrário das duas formas de S supracitadas, o teor de S orgânico variou pouco com a aplicação de S (Quadro 14). Embora o enxofre e o nitrogênio mostrem-se bastantes semelhantes na planta, eles diferem pelo fato de que o S orgânico reduzido pode ser reoxidado a sulfato no interior do vegetal (SEKIYA et al., 1982; MARSCHNER, 1995). Assim, acredita-se que, em determinadas situações, não apenas a fração de S solúvel, mas também a fração orgânica reduzida de folhas maduras possa servir como fonte de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para órgãos em crescimento.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a redistribuição da fração orgânica de S depende do suprimento de N. Durante a fase vegetativa da soja SUNARPI e ANDERSON (1996) demonstraram que, independente do nível de S, em condições de alto N, a exportação do enxofre da fração insolúvel (proteínas) das folhas maduras era desprezível. Parece existir um mecanismo comum, provavelmente proteólise, com subsequente transporte de S e de N na forma de aminoácidos e, ou, pequenos peptídeos das folhas maduras para outras partes da planta, processo que é inibido em altos níveis de N, mesmo sob deficiência de S (SUNARPI e ANDERSON, 1997).

Por substituição das doses recomendáveis de S (Quadro 9) nas equações ajustadas para os teores de S total e de sulfato nas folhas

indicadoras em função das doses de S aplicadas (Quadro13) foi possível estimar os níveis críticos de S no cafeeiro (Quadro 15). Os níveis críticos de S total e de S-SO<sub>4</sub> não se correlacionaram com nenhuma das características do solo, indicadoras da CT de S, contrário ao verificado para fósforo (MUNIZ et al., 1985). Estes autores observaram que a concentração crítica de P na parte aérea da soja variou inversamente com a capacidade tampão de fosfato dos solos. Segundo NOVAIS et al. (1995), o influxo de P (quantidade absorvida/ unidade de tamanho de raiz/ unidade de tempo) varia com a concentração (atividade) do nutriente na solução. Assim, o influxo e, conseqüentemente, o conteúdo do nutriente na planta serão maiores naqueles solos com menor capacidade tampão e sem grandes limitações no transporte do nutriente. Comparativamente ao P, parece que o S apresenta-se menos relacionado, ou mais fracamente ligado a fração coloidal do solo, o que poderia explicar a ausência de correlações entre os teores críticos de S no cafeeiro e a capacidade tampão dos solos.

Os níveis críticos de S total nas folhas indicadoras do cafeeiro variaram de 0,14 a 0,24 dag/kg (Quadro 15), valores que concordam com o intervalo (0,16 a 0,25 dag/kg) considerado adequado por MALAVOLTA (1986). Com relação ao nível crítico de sulfato, excetuando-se o solo Monte Santo, cujo teor crítico foi de apenas 0,014 dag/kg, as demais amostras apresentaram em suas folhas indicadoras, na condição de 90 % da produção máxima, valores superiores a 0,020 dag/kg de sulfato (Quadro 15), teor, reportado por GUIMARÃES e PONTE (1978), como limite de suficiência para o cafeeiro.

Pelo exposto, depreende-se que tanto o teor de S total quanto o de S-SO<sub>4</sub> podem ser usados como bons indicadores do status de S do cafeeiro. Conclusão similar foi obtida, recentemente, por ZHAO et al. (1996) para o trigo cujos níveis críticos foram de 0,15 dag/kg de S total e 0,019 dag/kg de S-sulfato. Entretanto, cabe enfatizar que o S-SO<sub>4</sub>, além de ser uma medição mais simples, mostrou-se mais sensível às variações nas doses de S aplicadas que o S total.

Quadro 13 - Equações dos teores de S total e de S-Sulfato (S-SO<sub>4</sub>) de folhas indicadoras, em dag/kg, de plantas de café, cultivar Catuaí, em função das doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de diferentes solos

Variável	Solo	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
S total	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\bar{Y}^c = \bar{Y} = 0,25$	
	LVh <sub>b</sub> - MAN	$\bar{Y}^c = \bar{Y} = 0,24$	
	LV <sub>a</sub> - PAT	$\bar{Y}^c = 0,038 + 0,0065^{**} S - 0,000040^{**} S^2$	0,973
	LV <sub>b</sub> - PAT	$\bar{Y}^c = 0,065 + 0,0045^{**} S - 0,000025^{**} S^2$	0,996
	LR <sub>a</sub> - SSP	$\bar{Y}^c = 0,138 + 0,0018^{**} S - 0,000012^{**} S^2$	0,973
	LR <sub>b</sub> - SSP	$\bar{Y}^c = 0,115 + 0,0223^{**} S^{0,5} - 0,001431^{**} S$	0,755
	LR <sub>a</sub> - LAV	$\bar{Y}^c = 0,111 + 0,0070^* S^{0,5} + 0,000974^{**} S$	0,974
	LE <sub>1a</sub> - MAC	$\bar{Y}^c = 0,114 + 0,0064^* S^{0,5} + 0,000260 S$	0,950
	LE <sub>2a</sub> - MAC	$\bar{Y}^c = 0,110 + 0,0094^{**} S^{0,5} + 0,000367 S$	0,998
	LU <sub>a</sub> - VIC	$\bar{Y}^c = 0,158 + 0,0030^{**} S - 0,000028^{**} S^2$	0,463
	PV <sub>a</sub> - PTN	$\bar{Y}^c = 0,097 + 0,0137^{**} S^{0,5} + 0,000897^* S$	0,970
	AQ <sub>a</sub> - MTS	$\bar{Y}^c = 0,098 + 0,0159^{**} S^{0,5} + 0,000072 S$	0,911
	S-SO <sub>4</sub>	LVh <sub>a</sub> - MAN	$\bar{Y}^c = 0,012 + 0,0047^{**} S^{0,5} + 0,000493^{**} S$
LVh <sub>b</sub> - MAN		$\bar{Y}^c = 0,075 + 0,0008^{**} S$	0,956
LV <sub>a</sub> - PAT		$\bar{Y}^c = -0,003 + 0,0013^{**} S - 0,000006^{**} S^2$	0,948
LV <sub>b</sub> - PAT		$\bar{Y}^c = 0,001 + 0,0009^{**} S - 0,000004^{**} S^2$	0,771
LR <sub>a</sub> - SSP		$\bar{Y}^c = 0,021 + 0,0058^{**} S^{0,5} - 0,000062 S$	0,956
LR <sub>b</sub> - SSP		$\bar{Y}^c = 0,009 + 0,0016^{**} S - 0,000010^{**} S^2$	0,924
LR <sub>a</sub> - LAV		$\bar{Y}^c = -0,0007 + 0,0017^{**} S - 0,000011^{**} S^2$	0,874
LE <sub>1a</sub> - MAC		$\bar{Y}^c = 0,0046 + 0,0099^{**} S^{0,5} - 0,000233^{**} S$	0,976
LE <sub>2a</sub> - MAC		$\bar{Y}^c = 0,014 + 0,0015^{**} S - 0,000009^{**} S^2$	0,984
LU <sub>a</sub> - VIC		$\bar{Y}^c = 0,021 + 0,0009^{**} S - 0,000005^{**} S^2$	0,897
PV <sub>a</sub> - PTN		$\bar{Y}^c = 0,006 + 0,0022^{**} S - 0,000017^{**} S^2$	0,979
AQ <sub>a</sub> - MTS		$\bar{Y}^c = 0,009 + 0,0004^{**} S$	0,959

o,\* e \*\*: Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.  
a e b : profundidades 0-20 e 40-60 cm , respectivamente.

Quadro 15 - Níveis críticos de S total e de S-Sulfato nas folhas indicadoras, com base na produção de matéria seca da parte aérea de plantas de café, cultivar Catuaí, doze meses após o transplântio, nos diversos solos estudados

SOLO	S TOTAL	S-SULFATO
	----- dag/kg -----	
LV <sub>a</sub> - PAT	0,18	0,025
LV <sub>b</sub> - PAT	0,24	0,039
LR <sub>a</sub> - SSP	0,15	0,033
LR <sub>b</sub> - SSP	0,19	0,038
LR <sub>a</sub> - LAV	0,14	0,021
LE <sub>1a</sub> - MAC	0,15	0,037
LE <sub>2a</sub> - MAC	0,16	0,022
LU <sub>a</sub> - VIC	0,16	0,022
PV <sub>a</sub> - PTN	0,16	0,032
AQ <sub>a</sub> - MTS	0,15	0,014

### 3.5. Relação entre os teores de S no solo e a resposta da planta

Por definição, o teor de um nutriente no solo obtido por determinada metodologia de extração só é considerado disponível quando se correlaciona estreitamente com o conteúdo desse nutriente na planta. Com essa finalidade, estudou-se o relacionamento entre os teores de S avaliados pelos três extratores antes do plantio e alguns dados de resposta do cafeeiro (Quadro 16).

Apesar da grande sensibilidade do  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc à capacidade tampão de sulfatos evidenciada pelas estreitas correlações com características do solo que a estimam, nas testemunhas, esse extrator não se correlacionou tão bem com o conteúdo de S na planta, contrastando com o  $\text{NH}_4\text{OAc}$  em HOAc, que apresentou melhores correlações. No controle, sem adição de S, o S relativo ( $90 \cdot \text{teor de S (dose zero)} / \text{Nível crítico}$ ) obtido pelo  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc apresentou as seguintes relações com a produção de matéria seca da parte aérea ( $r = 0,562^*$ ), crescimento relativo ( $r = 0,712^{**}$ ) e conteúdo de S ( $r = 0,579^*$ ), enquanto o S relativo pelo  $\text{NH}_4\text{OAc}$  em HOAc correlacionou-se melhor com produção de matéria seca ( $r = 0,813^{**}$ ), crescimento relativo

( $r = 0,780^{**}$ ) e com o conteúdo de S ( $r = 0,851^{***}$ ). Isto provavelmente deveu-se à intensa mineralização da matéria orgânica dos solos ocasionada pelas condições apropriadas (temperaturas elevadas, umidade e nutrientes) no interior da casa de vegetação durante o grande período de cultivo (12 meses). A correlação verificada entre os níveis críticos obtidos pelo  $\text{NH}_4\text{OAc}$  em HOAc e o teor de matéria orgânica ( $r = 0,678^{**}$ ) vem reforçar essa idéia.

FONTES et al. (1982a), trabalhando com solos de Minas Gerais, e, ALVAREZ V. et al. (1983), com solos de cerrado, mostraram ser o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc o extrator mais adequado para avaliar a disponibilidade de S para o sorgo e para o eucalipto. HARON e HANSON (1988) também encontraram altíssima correlação entre o S disponível por esse extrator e o S absorvido por plantas de milho.

Embora a resposta da planta seja o mais importante, acredita-se que, para o cafeeiro cultivado em condições de campo, o extrator  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc represente mais fielmente a disponibilidade de S no solo que o extrator  $\text{NH}_4\text{OAc}$  em HOAc. Essa pressuposição baseia-se também nos resultados de DIAS (1992), onde foi observado que o S extraído com  $\text{NH}_4\text{OAc}$  e HOAc correlacionou-se melhor com a quantidade de  $\text{SO}_4^{2-}$  lixiviada do que o S extraído com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em HOAc ou  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol/L.

Além das testemunhas, é igualmente importante avaliar a eficiência dos extratores em predizer a disponibilidade de S para o conjunto de todas as doses. Nessa condição, para os três extratores estudados, os teores de S recuperados não se correlacionaram com o conteúdo de S na planta. Já a variável S relativo, correlacionou-se melhor com o S absorvido pelo cafeeiro, cujos valores foram  $0,783^{**}$ ,  $0,638^*$  e  $0,602^*$ , para o AM-Ac, FM-Aa e FM-Ac, respectivamente, para o conjunto das doses adicionadas. Diante disso, pode-se concluir que os três extratores apresentaram baixa capacidade preditiva da disponibilidade de S para o cafeeiro nos solos adubados.

## **CAPÍTULO 2**

### **NÍVEIS CRÍTICOS E EFICIÊNCIA NUTRICIONAL PARA ENXOFRE DE CINCO CULTIVARES DO CAFEIEIRO ARÁBICA EM DOIS SOLOS DE MINAS GERAIS**

#### **1. INTRODUÇÃO**

##### **1.1. Cultivares de café**

Dos cultivares de café existentes, o Catuaí e o Mundo Novo são os preferidos para o plantio no Estado de Minas Gerais. O cultivar Catuaí apresenta bom vigor vegetativo, rusticidade e excelente produtividade. Seu porte baixo, em média 2,2 m, facilita o manejo da lavoura, os tratos culturais e a colheita. Quando utilizado em menores espaçamentos, resulta em maior produtividade por área em comparação ao Mundo Novo, entretanto, depois de uma carga alta, demora mais para se recuperar. Além disso, mostra-se menos prejudicado por deficiências de cálcio, magnésio e pela ferrugem do cafeeiro (BRASIL..., 1986). No entanto tem, como principal desvantagem, a maturação de frutos desuniforme e tardia em consequência de vários florescimentos que surgem no início do período das chuvas (FAZUOLI, 1986).

O Mundo Novo apresenta excelente vigor vegetativo, rusticidade e produtividade. A maturação dos frutos desse cultivar é mais uniforme e precoce que a do Catuaí. Todavia, seu porte alto (~3,0 m) dificulta o manejo da lavoura,

principalmente a colheita, gerando a necessidade de podas ocasionais (EMPRESA... - EPAMIG, 1994).

O cultivar Catuaí Rubi originou-se de cruzamentos de seleções de Catuaí com Mundo Novo. Apresenta porte e diâmetro de copa similares aos do Catuaí e também excelentes produtividade e vigor vegetativo. Diferentemente do Catuaí, a maturação de seus frutos é mais precoce e uniforme, intermediária entre a do Catuaí e a do Mundo Novo (EMPRESA... - EPAMIG, 1994).

O cultivar Acaia teve origem a partir de seleção do Mundo Novo. O nome Acaia significa, em guarani, fruto com sementes grandes, o que caracteriza esse cultivar. Embora apresente boas produções e rusticidade, tem porte alto, suas plantas adultas atingem, em média, 3,5 m com 1,8 m de diâmetro da copa (FAZUOLI, 1986).

O Icatu foi obtido inicialmente por meio de hibridação interespecífica entre *C. canephora* e *C. arabica*. Posteriormente, diversos retrocruzamentos para *C. arabica* foram feitos, principalmente com plantas selecionadas de Mundo Novo. Sua principal característica é a resistência ao agente da ferrugem (*Hemileia vastatrix*). O porte, o diâmetro e a produtividade são semelhantes aos do cultivar Mundo Novo (FAZUOLI, 1986).

Com essa breve caracterização, fica evidente que os cultivares de café são bastante diferentes entre si, o que, aliado à exigência relativamente grande em S pelo cafeeiro, justifica o estudo das variações nos níveis críticos e na eficiência nutricional de enxofre entre os genótipos.

## **1.2. Eficiência nutricional e níveis críticos**

Não apenas entre espécies, mas também entre genótipos de uma espécie pode existir grande diversidade quanto a absorção, transporte, redistribuição e utilização de nutrientes dentro da planta (CLARK, 1983). Tais diferenças já foram verificadas para vários minerais, especialmente para o P, N e Fe. Alguns genótipos são mais eficientes na absorção ou na utilização do nutriente que outros.

A eficiência nutricional é avaliada pela capacidade de absorção (aquisição) e pela capacidade de utilização de nutrientes (CLARK, 1983;

MARSCHNER, 1995). Aquisição é definida como o processo pelo qual as plantas absorvem os nutrientes do solo pelas suas superfícies radiculares e os transportam através da plasmalema até o citoplasma das células da raiz. A eficiência na absorção de nutrientes é a capacidade de extrair nutrientes em condições de baixa disponibilidade no solo (CLARKSON, 1985), e é geralmente definida em termos da absorção total pela planta (conteúdo) ou da taxa de absorção específica (quantidade do nutriente absorvido por comprimento ou por massa de matéria seca da raiz). A eficiência de utilização consiste em quantificar a produção de biomassa por cada unidade de nutriente absorvida e pode ser medida por vários índices, como o da “eficiência de utilização” (EFU = kg de biomassa<sup>2</sup>/kg de nutriente), proposto por SIDDIQI e GLASS (1981), e o coeficiente de utilização biológico (CUB = kg de biomassa/ kg de nutriente).

Na maioria dos casos, alta eficiência nutricional está relacionada ao crescimento e atividade das raízes e, em alguns casos, ao transporte do nutriente das raízes para a parte aérea. Desta forma observa-se que, uma maior eficiência, geralmente é acompanhada por um menor nível crítico na planta (MARSCHNER, 1995) e, acredita-se, também, no solo.

A maior eficiência na aquisição de nutrientes pelas raízes pode ser alcançada por meio de vários mecanismos. Dentro de uma espécie, genótipos podem diferir em termos da afinidade do sistema de absorção ( $K_m$ ) e na concentração mínima ( $C_{min}$ ), que é definida como aquela concentração em que a absorção líquida de íons é nula, ou seja o influxo é igual ao efluxo. As plantas também podem apresentar variações quanto a taxa de absorção de nutriente por unidade de comprimento de raiz, o que pode ser causado por diferentes taxas de influxo, ou presença de pelos radiculares de comprimentos diversos ou ainda, diferentes razões matéria seca da raiz/ matéria seca da parte aérea. Além disso, alguns genótipos são capazes de mobilizar quantidades apreciáveis de nutrientes do solo por meio de mudanças no pH da rizosfera e por exsudação radicular (CLARK, 1983; MARSCHNER, 1995).

Nos últimos anos, a busca de uma agricultura de menor custo energético e ecologicamente sustentável tem estimulado a pesquisa de identificação de mecanismos responsáveis pela maior eficiência nutricional visando o seu aproveitamento por meio de seleção e de outros métodos de melhoramento de plantas. Tais estudos são imprescindíveis, pois, em condições de baixa

disponibilidade de nutrientes, acidez do solo e déficit hídrico, alta eficiência de absorção é desejável (NOVAIS et al., 1990), bem como seria importante na recuperação dos fertilizantes aplicados, sobretudo dos pouco solúveis.

Este trabalho objetivou avaliar as variações nos níveis críticos e na eficiência de utilização de S de cinco cultivares do cafeeiro arábica de um ano de idade cultivados em casa de vegetação em dois solos de Minas Gerais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizaram-se amostra subsuperficial (40 - 60 cm) de um Latossolo Roxo de São Sebastião do Paraíso (LR<sub>b</sub>) e superficial (0 - 20 cm) de um Podzólico Vermelho-Amarelo de Ponte Nova (PV<sub>a</sub>) cujas características químicas e físicas são apresentadas no Quadro 1.

As amostras dos solos foram secas ao ar e passadas em peneira de 4mm. Em seguida, subamostras de 5,5 dm<sup>3</sup> foram incubadas com uma mistura de CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> comerciais na relação de 4:1 mols. A quantidade de corretivo foi calculada baseando-se nos teores de argila e de Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis (COMISSÃO..., 1989). Após aplicação do corretivo, as amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas e incubadas, mantendo-se a umidade em torno de -10 kPa, por um período de 30 dias.

Após secagem e homogeneização, as amostras de solos receberam as doses de enxofre, definidas de acordo com o teor de P remanescente de cada amostra e dos níveis 0; 0,5; 1; 2; 3; e 5. Também as doses de P foram definidas de acordo com o valor de P remanescente (ALVAREZ V. e FONSECA, 1990). Assim, o Latossolo Roxo recebeu as doses 0, 14, 28, 56, 84 e 140 mg/dm<sup>3</sup> de S e 350 mg/dm<sup>3</sup> de P, enquanto, o Podzólico Vermelho-Amarelo recebeu 0, 8, 16, 32, 48 e 80 mg/dm<sup>3</sup> de S e 210 mg/dm<sup>3</sup> de P. Utilizaram-se como fontes de S o (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e de P o Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O, aplicados de forma distribuída em todo volume de solo. Simultaneamente, foram aplicadas doses de nivelamento para N e K. A umidade foi ajustada para -10 kPa e essas amostras umedecidas foram

Quadro 1 - Características físicas e químicas das amostras de Latossolo Roxo de São Sebastião do Paraíso e de Podzólico Vermelho-Amarelo de Ponte Nova

Característica	SOLO	
	LR <sub>b</sub> - S. S. Paraíso	PV <sub>a</sub> - Ponte Nova
Areia grossa (%) <sup>1/</sup>	5	50
Areia fina (%) <sup>1/</sup>	27	22
Silte (%) <sup>1/</sup>	19	6
Argila (%) <sup>1/</sup>	49	22
Dens. aparente (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>2/</sup>	1,22	1,32
Eq. de umidade (kg/kg)	0,234	0,144
Água retida (kg/kg)		
-10 kPa	0,271	0,162
-30 kPa	0,225	0,134
-1.500 kPa	0,185	0,093
Matéria Orgânica (dag/kg) <sup>3/</sup>	1,41	1,46
pH-H <sub>2</sub> O <sup>4/</sup>	5,20	4,87
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	0,03	0,40
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	0,27	0,53
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	0,00	0,13
SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>6/</sup>	0,30	0,71
t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>7/</sup>	0,33	1,11
H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>8/</sup>	2,80	3,90
T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>9/</sup>	3,10	4,61
V (%) <sup>10/</sup>	9,68	15,40
m (%) <sup>11/</sup>	9,09	36,04
K (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>12/</sup>	10,33	18,67
P (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>12/</sup>	0,13	1,27
P remanescente (mg/L)	3,87	31,63

1/ Método da pipeta; 2/ Método da proveta; 3/ Método Walkley e Black; 4/ Relação solo-água 1:2,5; 5/ Extrator KCl 1 mol/L; 6/ Soma de bases; 7/ CTC efetiva; 8/ Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L pH 7,0; 9/ CTC a pH 7,0; 10/ Porcentagem de saturação de bases; 11/ Porcentagem de saturação de alumínio; 12/ Extrator Mehlich-1; LR - Latossolo Roxo; PV - Podzólico Vermelho-Amarelo; a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

mantidas em sacos plásticos fechados por 30 dias. Após isso, realizou-se amostragem dos solos e transferência das amostras de 5,0 dm<sup>3</sup> para vasos plásticos, representando cada vaso uma unidade experimental.

Em seguida, foram transplantadas para cada vaso quatro plântulas de café, em estágio de “orelha de onça”, e, após dois desbastes, mantiveram-se as duas plantas mais desenvolvidas. Foram utilizados cinco cultivares de café (*Coffea arabica* L.): Catuaí Vermelho (LCH 2077-2-5-44); Icatu Amarelo; Catuaí Rubi (MG 1192); Acaíá Cerrado (MG 1474-1); e Mundo Novo (LCMP 464-18). O ensaio constituiu-se em um fatorial 2 x 5 x 6, sendo dois solos, cinco cultivares e seis doses de S, que, com três repetições, foram dispostos em blocos casualizados. Em virtude da intensa radiação solar e das elevadas temperaturas no interior da casa de vegetação durante o verão, fez-se necessário o uso de sombreamento (tela sombrite) a fim de garantir a sobrevivência das plantas nesse período.

Durante o período de cultivo (12 meses), a umidade do solo foi mantida em torno de -10 kPa pela adição de água destilada. Mensalmente, foram aplicados a cada unidade experimental 20 mg/dm<sup>3</sup> de N, fornecidos como (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO em forma de solução. Os micronutrientes também foram fornecidos em solução, de modo que fossem adicionados a cada dm<sup>3</sup> de solo um total de 0,813 mg de B (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), 3,664 mg de Mn (MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O), 4 mg de Zn (ZnCl<sub>2</sub>), 1,329 mg de Cu (CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), 1,556 mg de Fe (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) e 0,15 mg de Mo (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) (ALVAREZ V., 1974). Essas doses foram igualmente parceladas em seis aplicações. No Latossolo Roxo (S. S. Paraíso), as plantas de café começaram a exibir sintomas de deficiência de Zn por volta do 4<sup>o</sup> mês após o transplântio, gerando, assim, a necessidade de mais quatro aplicações desse micronutriente, no total de 4 mg/dm<sup>3</sup> de Zn na forma de ZnCl<sub>2</sub>.

Aos 12 meses após o transplântio, avaliaram-se a altura média das plantas, o diâmetro médio dos caules a 2 cm do solo e a área foliar, utilizando-se o aparelho de medição de área foliar “Delta -T devices”. Em seguida, procedeu-se à colheita; as plantas foram divididas em sistema radicular, caule + ramos, folhas novas (gemmas, 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> pares), folhas indicadoras (3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> pares) e folhas maduras (restantes). Após a secagem, o material vegetal foi pesado e, subseqüentemente, moído e mineralizado por digestão nítrico-perclórica e, no

extrato obtido, procedeu-se à dosagem de S por turbidimetria (BLANCHAR et al., 1965), com adaptação de ALVAREZ V. e DIAS (s.d.a). Na matéria seca foi determinado ainda o teor de S-SO<sub>4</sub>, extraído com ácido acético, 0,333 mol/L (JONES, 1975), e dosado turbidimetricamente (BLANCHAR et al., 1965). O teor de S orgânico foi calculado por diferença entre o S total e o S-SO<sub>4</sub>.

Amostras de solo de todas as unidades experimentais foram secas e passadas em peneira de 2 mm para análise dos teores de S. O S disponível foi avaliado por três extratores: NH<sub>4</sub>OAc 0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L [AM-Ac] (BARDSLEY e LANCASTER, 1960); com Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em H<sub>2</sub>O [FM-Aa] (FOX et al., 1964); e com Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L [FM-Ac] (HOEFT et al., 1973), quantificados por turbidimetria conforme CHESNIM e YIEN (1950) com adaptação de ALVAREZ V. e DIAS (s.d.a).

Equações de regressão foram ajustadas à produção de matéria seca da parte aérea das plantas, aos teores de S recuperados pelos três extratores e aos teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> das folhas indicadoras como variáveis dependentes das doses de S adicionadas em cada solo. Com as equações de produção de matéria seca em função do S aplicado, estimaram-se as doses recomendáveis de S, doses necessárias para se atingir 90 % da produção máxima. Pela substituição das doses recomendáveis nas equações que relacionam os teores de S no solo e nas folhas indicadoras com as doses de S adicionadas, foram obtidos os níveis críticos deste nutriente, por solo e por cultivar, para os três extratores e para o S total e S-SO<sub>4</sub> nas folhas indicadoras.

Para avaliar a eficiência nutricional de S no nível crítico, adotou-se a relação proposta por SIDDIQI e GLASS (1981), em que  $EFU = \text{matéria seca}^2 / \text{conteúdo de S}$ . O coeficiente de utilização biológico foi determinado com a seguinte fórmula:  $CUB = \text{matéria seca} / \text{conteúdo de S}$  em que matéria seca e conteúdo de S referem-se às quantidades de biomassa seca e de S acumuladas na parte aérea na condição de 90 % da produção máxima.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Teores de S disponível no solo avaliados antes do cultivo

A recuperação do S adicionado variou com o extrator, obedecendo a seguinte ordem decrescente: AM-Ac > FM-Aa > FM-Ac (Quadro 2). Similarmente, DIAS (1992) também observou que o extrator AM-Ac recuperou maiores quantidades de S que o FM-Ac ou  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol/L.

Segundo REISENAUER (1975), o FM-Aa extrai a fração do sulfato solúvel e parte do sulfato adsorvido, enquanto o FM-Ac pode extrair essas duas formas e porções do S orgânico. Observou-se que o FM-Aa recuperou maiores quantidades de S do que o FM-Ac (Quadro 2), concordando com os resultados obtidos por FONTES (1979). Por outro lado, os solos de regiões de clima temperado, geralmente apresentam uma tendência contrária, ou seja, o FM-Ac extrai maiores quantidades de S que o FM-Aa. Isso, provavelmente, deve-se à grande diferença entre os solos das duas regiões, pois os solos tropicais, diferentemente daqueles de regiões temperadas, são, em sua maioria, muito intemperizados, com carga variável, ricos em óxidos de ferro e alumínio e com teores relativamente baixos de matéria orgânica.

A recuperação do S adicionado foi maior no solo mais arenoso de Ponte Nova do que no argiloso de S. S. Paraíso, provavelmente porque no arenoso o S aplicado permanece em formas mais solúveis. Entretanto, cabe chamar a atenção para os maiores teores de S do solo e de S de reserva da amostra de Ponte Nova (143 e 132 mg/dm<sup>3</sup> de S respectivamente), o que não permite assegurar com exatidão quais as formas de S recuperadas. Além disso,

Quadro 2 - Concentrações de enxofre disponível com  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/l e  $\text{HOAc}$  0,25 mol/L (AM-Ac), com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) e com  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{HOAc}$  2 mol/L (FM-Ac), avaliados antes do cultivo das plantas de café, em função de doses de S aplicadas em amostras de solos  $\text{LR}_b$  de S. S. do Paraíso e  $\text{PV}_a$  de Ponte Nova

DOSES DE S	EXTRATOR		
	AM-Ac	FM-Aa	FM-Ac
----- mg/dm <sup>3</sup> -----	----- mg/dm <sup>3</sup> -----		
$\text{LR}_b$ - S. S. do Paraíso			
0	6,35	4,26	1,56
14	12,97	8,49	2,36
28	21,90	13,31	2,98
56	35,62	23,33	5,52
84	61,15	32,50	9,14
140	90,77	44,79	36,27
$\text{PV}_a$ - Ponte Nova			
0	10,64	4,25	6,17
08	19,57	10,57	7,58
16	29,47	20,42	14,28
32	37,97	31,42	24,57
48	55,15	45,86	47,09
80	82,69	80,94	67,31

a e b: Profundidades 0 - 20 e 40 - 60 cm, respectivamente.

observa-se que, nesse solo, as diferenças entre as quantidades extraídas pelos três extratores são menores que no argiloso, especialmente nas maiores doses de S aplicadas, sendo a baixa capacidade tampão do solo arenoso, a explicação mais provável.

Objetivando definir níveis críticos no solo, equações de regressão foram ajustadas aos teores de S disponível pelos três extratores em função das doses de S adicionadas (Quadro 3).

A concentração de S disponível não foi relacionada com outras características do solo, por ter-se trabalhado com apenas dois solos. Como os modelos curvilíneos apresentam declividades ( $\Delta S_{rp}/\Delta S_{ad}$ ) variáveis, torna-se difícil a visualização das diferenças entre os extratores, o que não ocorre nos modelos lineares, já que apresentam declividade única. Na amostra LR<sub>b</sub>, verifica-se que, para cada mg/dm<sup>3</sup> de S adicionado a este solo, ter-se-á um acréscimo de 0,619 mg/dm<sup>3</sup> de S recuperado com o extrator AM-Ac, contra apenas 0,296 mg/dm<sup>3</sup> de S extraído com o FM-Aa (Quadro 3). E para o FM-Ac, um modelo de regressão linear teria um valor de declividade ainda menor, em concordância com seus valores de S recuperado (Quadro 2). Além disso, com o AM-Ac, os coeficientes lineares, 0,619 e 0,882, para o LR<sub>b</sub> e PV<sub>a</sub>, respectivamente, mostram que a quantidade de S recuperada por esse extrator no solo mais arenoso (PV<sub>a</sub>) foi maior que no argiloso (LR<sub>b</sub>) (Quadro 3).

Quadro 3 - Equações do S disponível em NH<sub>4</sub>OAc 0,5 mol/L e HOAc 0,25 mol/L (AM-Ac), Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg/L de P, em H<sub>2</sub>O (FM-Aa) e em HOAc 2mol/L (FM-Ac), em mg/dm<sup>3</sup>, avaliados antes do cultivo das plantas de café, em função de doses de S aplicadas, em mg/dm<sup>3</sup>, em amostras de solos LR<sub>b</sub> de S. S. do Paraíso e PV<sub>a</sub> de Ponte Nova

Extrator	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
LR <sub>b</sub> - S. S. do Paraíso		
AM-Ac	$\hat{Y}^c = 4,88 + 0,619^{**} S$	0,993
FM-Aa	$\hat{Y}^c = 5,20 + 0,296^{**} S$	0,988
FM-Ac	$\hat{Y}^c = 1,41 + 0,097^* S - 0,0017^* S^2 + 0,00002^{**} S^3$	0,999
PV <sub>a</sub> - Ponte Nova		
AM-Ac	$\hat{Y}^c = 12,21 + 0,882^{**} S$	0,994
FM-Aa	$\hat{Y}^c = 5,01 + 0,766^{**} S + 0,0022^{**} S^2$	0,997
FM-Ac	$\hat{Y}^c = 3,24 + 0,770^{**} S + 0,0006^0 S^2$	0,979

o, \* e \*\*: Significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; a e b: Profundidades 0-20 e 40-60 cm, respectivamente.

## 3.2. Resposta dos cultivares à aplicação de enxofre no solo

### 3.2.1. Características de crescimento da planta

Observa-se que os cultivares de café responderam bem ao S aplicado em termos de área foliar, altura, diâmetro do caule e produção de matéria seca (Quadros 4 e 5). Dos cinco cultivares estudados, o Rubi apresentou maiores área foliar e diâmetro do caule concordando com os seus maiores acúmulos de matéria seca na parte aérea e no caule (Quadros 4 e 5). Segundo EMPRESA... – EPAMIG (1994), o cultivar Rubi é mais produtivo do que o Catuaí.

Após o Rubi, foi o Catuaí que apresentou maiores área foliar e produção de matéria seca (Quadros 4 e 5). Este resultado é contrário ao de CORREA et al. (1983) que, em ensaio de campo, não observaram diferenças quanto a produção de matéria seca entre os cultivares Mundo Novo e Catuaí de até doze meses de idade e, de 18 a 54 meses de idade, o Mundo Novo produziu maior quantidade de matéria seca que o Catuaí.

Além de mais produtivos, os cultivares Rubi e Catuaí são de porte baixo, evidenciado pelas suas menores alturas (Quadro 4), característica importante para o manejo da lavoura, principalmente para a colheita. Dos cultivares de porte alto, o Icatu e o Acaiá mostraram-se, em média, superiores em altura ao Mundo Novo (Quadro 4), concordando, em parte, com FAZUOLI, (1986) que caracterizou o Acaiá como sendo uma planta de porte mais esguio que os outros dois.

Para expressar a relação entre o S adicionado e a produção de matéria seca de folhas, caules, parte aérea e raízes dos cinco cultivares, as equações quadráticas ou raiz quadráticas foram as que apresentaram melhor grau de ajuste (Quadros 6 e 7).

A maior produção de biomassa do Rubi, provavelmente, deveu-se ao seu abundante enraizamento (Quadro 5), tanto no solo LR<sub>b</sub> (SSP), quanto no PV<sub>a</sub> (PTN). É interessante enfatizar que a matéria seca de suas raízes foi de aproximadamente o dobro daquela apresentada pelo sistema radicular de seu parente mais próximo, o Catuaí. Para o Rubi, nos dois solos, verificou-se uma razão PMS raiz/PMS parte aérea média de 0,6 contra um valor médio de 0,4 para o Catuaí e valores ainda menores para os cultivares de porte alto.

Parece existir uma relação entre a razão PMS raiz/PMS parte aérea e a eficiência nutricional de alguns elementos, especialmente, N, P e K. OZANNE et al., (1969), trabalhando com três espécies forrageiras, *Trifolium cherleri*, *Trifolium subterraneum* e *Lolium rigidum* observaram que, apesar da similar produção máxima de matéria seca da parte aérea das forrageiras, as doses de P recomendáveis para se alcançar 90 % da produção máxima foram, 302, 87 e 26 mg/kg de P, respectivamente. Os autores constataram que havia uma estreita correlação positiva entre a produção de matéria seca das raízes e a eficiência nutricional de P. Também em gramíneas silvestres eficientes em Zn, tem sido observado uma maior razão PMS da raiz/ PMS da parte aérea, em condições de deficiência desse micronutriente (CAKMAK et al., 1996).

CHEN e GABELMAN (1995), estudando a adaptação de 100 variedades de tomate, procedentes de diversos países, à deficiência de K, mostraram que o genótipo 576 do Peru era mais eficiente devido aos seus maiores valores de produção de matéria seca e comprimento de raízes, o que o capacitava absorver grande quantidade de K mesmo em baixa disponibilidade no solo.

### 3.2.2. Formas de enxofre na planta

Com relação aos teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> das folhas, caule e raízes pode-se verificar que, em geral, seus valores foram influenciados positivamente pelas doses de S (Quadros 8 e 9) independentemente do cultivar. Exceção feita para o caule, que se comportou de maneira distinta, pois, além de conter menores teores de S total do que as outras partes da planta, seus valores permaneceram praticamente constantes com o aumento das doses de S (Quadro 8). Resultados semelhantes foram obtidos para os cultivares Mundo Novo e Catuaí onde constatou-se que o caule de plantas com doze meses de idade, apresentava aproximadamente a metade do conteúdo e do teor de S total das folhas (CORREA et al., 1983).

Conforme relatado na literatura, o S-SO<sub>4</sub> mostrou-se mais sensível à variação na quantidade de S aplicada do que o S total (Quadros 8 e 9) sendo considerado o índice preferido para diagnosticar deficiências de S nas culturas. Outra grande vantagem do S-SO<sub>4</sub> é que a sua determinação, por prescindir da digestão nítrico-perclórica, é mais rápida e requer menores custo e trabalho em relação à medição do S total.

Contrastando com o S total e o S-SO<sub>4</sub>, o S orgânico variou pouco com o aumento da dose de S, independentemente do solo e do cultivar analisado (Quadro 10). No caule, os teores de S orgânico mostraram-se praticamente inalterados com a adição de S e, nas folhas e nas raízes, a maior diferença foi verificada na dose zero. Inclusive, nessa dose, a percentagem de S orgânico em relação ao S total foi maior do que a proporção nas outras doses (Quadros 8, 9 e 10). Isso porque, sob deficiência de S, as plantas apresentam praticamente todo o S na fração proteica (STEWART e PORTER, 1969).

O S orgânico, que constitui a maior fração do S total, é basicamente constituído pela metionina e cisteína, embora seja também encontrado, em menores quantidades, na glutatona, no ácido lipóico, nos tióis e nos peptídios sulfurados (BYERS e BOLTON, 1979; GOH e KEE, 1978). Quando há balanço adequado de N e S na planta, o S orgânico constitui de 80 a 95 % do S total, ficando o restante na forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Roberts, citado por BYERS e BOLTON, 1979). Segundo STEWART e PORTER (1969), altas doses de S acarretam

elevação do S total, aumentando o S inorgânico sem afetar o S orgânico, indicando um consumo de luxo de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Na diagnose foliar de cafeeiro, geralmente são utilizados o 3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> pares de folhas (indicadoras) a contar do ápice dos ramos em direção ao tronco, na altura média da planta, sendo os níveis críticos, freqüentemente expressos em relação a essas folhas. Assim, ajustou-se equações de regressão aos teores de S total e de S- $\text{SO}_4$  nas folhas indicadoras de acordo com o S adicionado (Quadro 11).

### **3.3. Níveis críticos de S no solo e na planta e eficiência nutricional**

De posse das equações de produção de matéria seca da parte aérea (Quadro 7) foram calculadas as doses recomendáveis de S que substituídas nas equações que relacionam o S disponível no solo (Quadro 3) e os teores de S total e de S- $\text{SO}_4$  nas folhas indicadoras (Quadro 11) em função das doses de S adicionadas, possibilitaram a obtenção dos níveis críticos de S no solo e na planta para cada cultivar de café, em cada solo (Quadros 12 e 13).

Conforme esperado, para o extrator FM-Ac, o solo argiloso ( $\text{LR}_b$ ) apresentou menores valores de nível crítico que o solo franco-argilo-arenoso ( $\text{PV}_a$ ). Os outros dois extratores, AM-Ac e FM-Aa, apresentaram valores mais elevados e que não se relacionaram bem com características do solo relacionadas à capacidade tampão de sulfatos dos mesmos (Quadro 12). Quanto ao comportamento dos cultivares, verificou-se que o Rubi e o Acaíá foram mais eficientes, uma vez que necessitaram de menores teores de S disponível para o seu crescimento ótimo, tanto no solo  $\text{LR}_b$ , como no  $\text{PV}_a$ .

Na condição de 90 % da produção máxima de matéria seca da parte aérea, os níveis críticos de S total nas folhas indicadoras dos cinco cultivares variaram de 0,14 a 0,22 dag/kg de S no solo  $\text{LR}_b$ , e de 0,15 a 0,24 no solo  $\text{PV}_a$ , enquanto os níveis críticos de S- $\text{SO}_4$  variaram de 0,017 a 0,038 e de 0,019 a 0,034 dag/kg de S, nos respectivos solos, dependendo do cultivar (quadro 13). Esses resultados são coerentes com aqueles relatados na literatura como teores adequados de S total e de S- $\text{SO}_4$  no cafeeiro (MALAVOLTA, 1986; GUIMARÃES e PONTE, 1978).

Em trabalhos com trigo (FRENEY et al., 1978; SPENCER e FRENEY, 1980) e com capim colômbio (SMITH e DOLBY, 1977), a razão S-SO<sub>4</sub>/S total foi considerada mais eficiente para diagnosticar deficiências de S por ter se mostrado menos influenciada pelos suprimentos de N e idade da planta e mais estreitamente relacionada com a produção do que o teor de S-SO<sub>4</sub>. Os resultados mostraram que plantas de trigo com mais de 10 % de seu S total na forma de sulfato encontravam-se adequadamente supridas com S. À exceção do Catuaí, que apresentou nível crítico da razão S-SO<sub>4</sub>/S total de 20 % nos dois solos, a mesma conclusão pode ser tirada para os outros cultivares de café (Quadro 13). As plantas do Catuaí acumularam, em suas folhas indicadoras, proporcionalmente mais SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e, conseqüentemente menos S orgânico do que as mesmas folhas dos outros cultivares. O comportamento diverso desse cultivar deve ser registrado, embora não se conheça uma justificativa razoável para tal fato.

Além de ser muito mais trabalhoso por exigir duas determinações, a razão S-SO<sub>4</sub>/S total foi criticada por SCAIFE e BURNS (1986) porque o numerador (S-SO<sub>4</sub>) é a causa de maior variação do denominador (S total), diminuindo, portanto, a sensibilidade desse índice comparativamente ao S total e S-SO<sub>4</sub> isolados.

Com relação à eficiência nutricional, observou-se que o cultivar Rubi apresentou maior eficiência de utilização (EFU) de S nos dois solos estudados (Quadro 13). Quanto ao coeficiente de utilização biológica (CUB), na amostra LR<sub>b</sub> de S. S. Paraíso, o Rubi foi também superior aos outros cultivares, enquanto, na amostra PV<sub>a</sub> de Ponte Nova, o CUB desse cultivar foi igual ao do Catuaí e superior àquele dos cultivares de porte alto. Após calcular o coeficiente de utilização biológica com os dados de CORREA et al. (1983), verificou-se que plantas do Catuaí com doze meses de idade apresentaram CUB de 1.282 contra 1.116 g de biomassa/ g de S absorvido para o Mundo Novo de mesma idade. Embora com valores de CUB inferiores aos de CORREA et al. (1983), nesse ensaio, o cultivar Catuaí também mostrou-se mais eficiente que o Mundo Novo, nos dois solos estudados (Quadro 13).

Os maiores sistema radicular e razão PMS raiz/ PMS parte aérea do Rubi pode explicar, pelo menos em parte, a grande eficiência em S desse cultivar, o que provavelmente está relacionado à aquisição do nutriente no solo,

idéia que é corroborada pelos seus baixos valores de nível crítico no solo, especialmente com FM-Ac (Quadro 12). Fato semelhante foi observado para o P, onde alguns trabalhos têm mostrado que essa capacidade de distribuir maior proporção de fotoassimilados para as raízes está sob controle genético e é um importante atributo de eficiência de P para plantas cultivadas em solos com baixos níveis desse nutriente (MARSCHNER, 1995).

Por outro lado, o Icatu e o Mundo Novo comportaram-se como os cultivares menos eficientes na nutrição de S (Quadro 13). Entretanto, quanto ao Icatu, é bom lembrar que, embora menos eficiente, apresenta a grande vantagem de resistência ao agente causador da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) e a nematóides (FAZUOLI, 1986).

Principalmente para o Rubi, genótipo mais recente, seria interessante avaliar a sua eficiência nutricional comparativamente à de outros cultivares na fase produtiva e em condições de campo já que, em se tratando do cafeeiro, a produção de frutos é o que mais interessa. Nesse sentido, foi mostrado, para os cafeeiros Mundo Novo e Catuaí de 3 a 4 anos, que a eficiência de utilização de S para a formação da colheita (colheita aos 3 anos + colheita aos 4 anos/ quant. de S acumulado nos dois anos) foi de 1.246 e 978, respectivamente (CORREA et al., 1983; MALAVOLTA, 1986). Como se vê, com o aumento da idade, ocorreu uma inversão na eficiência nutricional de S entre esses dois cultivares, pois, como já citado anteriormente, para plantas com doze meses, o Catuaí superou o Mundo Novo.

Pelo exposto, parece que os cultivares de porte baixo, especialmente o Rubi, são mais eficientes na aquisição e, ou, na utilização de S do que os de porte alto, com doze meses de idade. Essas diferenças entre cultivares no que se refere às exigências nutricionais são interessantes e podem ter implicações práticas importantes, principalmente para a cafeicultura de baixa renda, como a que ocorre predominantemente na Zona da Mata mineira.

### 3. RESUMO E CONCLUSÕES

Para correlacionar e calibrar métodos de análises de enxofre em solos e em plantas de café, dois experimentos foram realizados em casa de vegetação. No primeiro experimento, plantas de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí Vermelho, foram cultivadas em amostras de 12 solos empregados na cafeicultura de Minas Gerais; solos com ampla variação de sua capacidade tampão de S (CT). No outro, buscando avaliar as variações nos níveis críticos e na eficiência de uso de S, cinco cultivares de café, Catuaí Vermelho, Icatu Amarelo, Rubi, Acaiá Cerrado e Mundo Novo, foram cultivados em amostras de um LR de S. S. Paraíso e de um PV de Ponte Nova. Nos dois ensaios, os tratamentos consistiram de seis doses de S, definidas de acordo com o teor de P remanescente de cada amostra. Após a incubação com S e antes do transplântio, foram retiradas subamostras de solo para análises de S disponível em  $\text{NH}_4\text{OAc}$  0,5 mol/L e  $\text{HOAc}$  0,25 mol/L (AM-Ac), em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) e em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , 500 mg/L de P, em  $\text{HOAc}$  2 mol/L (FM-Ac). Doze meses após o transplântio, foram determinados a altura das plantas, o diâmetro do caule, a área foliar, a produção de matéria seca (PMS) e os teores de S total e de  $\text{S-SO}_4$  de raízes, de caules mais ramos e de folhas novas, indicadoras e maduras.

Com as curvas de resposta de PMS foram obtidas as doses recomendáveis de S que, substituídas nas equações do S recuperado ( $S_{rp}$ ) e dos teores de S total e de  $\text{S-SO}_4$  nas folhas indicadoras em função do S

adicionado (Sad), permitiram estimar as declividades ( $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad}$ ) e os níveis críticos (NiCri) por método de análise, por solo e por cultivar.

Os níveis críticos, por solo, com o extrator AM-Ac variaram de 9,76 a 23,86 mg/dm<sup>3</sup> de S, com o FM-Aa, de 3,02 a 20,79 e, com o FM-Ac, de 2,65 a 18,43 mg/dm<sup>3</sup>. Para o extrator FM-Ac observou-se que tanto as declividades ( $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad}$ ) como os níveis críticos correlacionaram-se bem com o equivalente de umidade e com os teores de argila e de P remanescente das amostras, características estreitamente relacionadas à CT de S. Os outros dois extratores apresentaram correlações inferiores para as declividades ( $\Delta \text{Srp}/\Delta \text{Sad}$ ) e os níveis críticos não se correlacionaram com essas características.

Entretanto, nas testemunhas, sem adição de S, o S relativo ( $90 \cdot \text{teor S (dose 0)}/\text{NiCri}$ ) obtido com o extrator AM-Ac apresentou melhores correlações com a PMS, com o crescimento relativo [ $\text{CR} = 100 \cdot \text{PMS (dose 0)}/\text{PMS (0,9 PMS máxima)}$ ] e com o conteúdo de S do que os outros dois extratores.

Ambos os índices, teor de S total e de S-SO<sub>4</sub> mostraram-se adequados para a diagnose foliar do cafeeiro. O teor de S-SO<sub>4</sub> apresentou maior sensibilidade à variação na dose de S aplicada, porém com maior coeficiente de variação que o S total. Os níveis críticos de S nas folhas indicadoras variaram de 0,14 a 0,24 dag/kg de S total e de 0,014 a 0,039 dag/kg de S-SO<sub>4</sub>, e não se correlacionaram com as características do solo que estimam a CT de S.

Com relação ao segundo ensaio, nos dois solos estudados, o cultivar Rubi apresentou maiores PMS da parte aérea e das raízes seguido pelo Catuaí. Já os cultivares de porte alto, Icatu, Acaiá e Mundo Novo acumularam menores quantidades de matéria seca na parte aérea e raiz. Os valores de níveis críticos de S disponível e de S total e S-SO<sub>4</sub> nas folhas indicadoras do cafeeiro mostraram-se variáveis de acordo com o solo e cultivar estudado.

Quanto à eficiência nutricional, observou-se que o cultivar Rubi apresentou maior eficiência de utilização (EFU) de S nos dois solos estudados. O coeficiente de utilização biológica (CUB) do Rubi também foi maior que o dos outros cultivares no LR, enquanto, no solo PV, o CUB desse cultivar foi igual ao do Catuaí e superior àquele dos cultivares de porte alto. A maior eficiência de

utilização de S dos cultivares de porte baixo, especialmente do Rubi, denota diferença quanto às exigências nutricionais dos cultivares, o que pode ter importantes implicações agronômicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. USA. John Wiley , Sons, Inc. 467p. 1977.
- ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V.H., FONTES, L.E.F. , FONTES, M.P.F. eds., **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, SBCS/ UFV/ DPS, 1996, p.615-660.
- ALVAREZ V., V.H. Enxofre: Critérios de diagnose para solo e plantas, correção de deficiências e excessos. In: BORKERT, C. M. , LANTMANN, A. F. eds., **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina, EMBRAPA - CNPSo/IAPAR/SBCS, 1988. p.31-59.
- ALVAREZ V., V.H. **Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois Latossolos de Minas Gerais**. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1974. 125p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1974.
- ALVAREZ V., V.H., DIAS, L.E. **Manual de análise de enxofre em solo, planta e fertilizantes**. Viçosa, Editora UFV. (no prelo) (S.d.a)
- ALVAREZ V., V.H., DIAS, L.E. **Manual de determinações químicas e fisicoquímicas de solos**. Viçosa, Editora UFV. (no prelo) (S.d.b)
- ALVAREZ V., V.H., DIAS, L.E. **Curso de especialização por tutoria à distância - Fertilidade e manejo do solo**. Brasília: ABEAS, 1996. 104p. (módulo 9 - Enxofre)
- ALVAREZ V., V.H., DIAS, L.E., NEVES, J.C.L., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. Níveis críticos de enxofre em solos de cerrado de Minas Gerais. I. Status do Enxofre. **R. Bras. Ci. Solo**, (no prelo) (S.d.)

- ALVAREZ V., V.H., FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato e para ensaios de casa de vegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, v.14, p. 49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H., FREIRE, F.M., GUIMARÃES, P.T.G. Concentrações relativas ótimas de nitrogênio, fósforo e enxofre, na adubação do cafeeiro, num Latossolo Vermelho-Escuro de Machado, MG. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.22, p.145-52, 1987 a.
- ALVAREZ V., V.H., GUIMARÃES, P.T.G., FREIRE, F.M. Concentrações relativas ótimas de fósforo e enxofre, na adubação do cafeeiro, num Latossolo Vermelho-Escuro de Machado, MG. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.22, P.359-65, 1987 b.
- ALVAREZ V., V.H., NOVAIS, R.F., NEVES, J.C.L., BARROS, N. F. Níveis críticos de enxofre em solos de cerrado para o crescimento de mudas de eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 19, 1983. Curitiba. **Resumos...** Curitiba: SBCS, 1983. p.164-65.
- BANSAL, K.N., MOTIRAMANI, D.P., PAL, A.R. Studies on sulfur in vertisols I- Soil and plant tests for diagnosing sulfur deficiency in soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Plant Soil**, v.70, n.1, p.133-40, 1983.
- BANSAL, K.N., PAL, A.R. Evaluation of a soil test method and plant analysis for determining the sulphur status of alluvial soils. **Plant Soil**, v.98, n.3, p.331-336, 1987
- BARDSLEY, C.E., LANCASTER, J.D. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v.24, n.4, p.265-68, 1960.
- BATES, T.E. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. **Soil Sci.**, v.112 p. 116-130, 1971.
- BISSANI, C.A. **Disponibilidade de enxofre para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, UFRGS, 1985. 198p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.
- BLANCHARD, R.W., REHM, G.W., CALDWELL, A.C. Sulfur in plant material by digestion with nitric and perchloric acid. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.29, n.1, p.71-72, 1965.
- BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio - IBC. **Cultura de café no Brasil**. Rio de Janeiro: 1986. 215 p.
- BYERS, M., BOLTON, J. Effects of nitrogen and sulphur fertilizers on the yield, N and S content, and amino acid composition of the grain of spring wheat. **J. Sci. Food Agric.**, v.30, p.251-263, 1979.

- CAKMAK, I., ÖZTÜRK, L., KARANLIK, S., MARSCHNER, H., EKIZ, H. Zinc-efficient wild grasses enhance release of phytosiderophores under zinc deficiency. **J. Plant Nutr.**, v.19, nos.3-4, p.551-63, 1996.
- CARVAJAL, J.F. **Cafeto cultivado y fertilización**. Bern, Suiza, Instituto Internacional de la Potassa, 1984. 254p.
- CHEN, J., GABELMAN, W.H. Isolation of tomato strains varying in potassium acquisition using a sand-zeolite culture system. **Plant Soil**, v.176, n.1, p.65-70, 1995.
- CHESNIN, L., YIEN, C.H. Turbidimetric determination of available sulfates. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.15, p.149-151, 1950.
- CLARK, R.B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation, and use of mineral elements required for plant growth. **Plant Soil**, v.72, nos.2-3, p.175-96, 1983.
- CLARKSON, D.T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v.36, p.77-115, 1985.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 4ª aproximação**. Lavras, 1989. 95 p.
- CORREA, J.B., GARCIA, A.W.R., COSTA, P.C. da Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 10, Poços de Caldas, **Anais**. Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1983, p.177-183.
- DIAS, L.E. **Dinâmica de formas de enxofre e de cátions trocáveis em colunas de solo tratadas com diferentes doses de fósforo e de gesso**. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1992. 147p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Viçosa, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979. v.1, n.p.
- EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS -EPAMIG. **'Catuaí Rubi'**, café para Minas. [S.l.]: 1994. (folder)
- FAGERIA, W.K. Adubação da cultura de arroz de sequeiro. In: CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ E FEIJÃO. ed. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Goiânia, EMBRAPA, 1984. P.221-245.

- FAZUOLI, L.C. Genética e melhoramento do cafeeiro. In: RENA, A.B., MALAVOLTA, E., ROCHA, M., YAMADA, T. **Cultura do cafeeiro**: Fatores que afetam a produtividade. Associação Brasileira para a pesquisa da Potassa e do fosfato, Piracicaba, 1986. p.87-113.
- FONTES, M.P.F. **Disponibilidade do enxofre em diferentes extratores químicos em alguns latossolos do Estado de Minas Gerais**. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1979. 63p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)- Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- FONTES, M.P.F., NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V.H., BORGES, A.C. Disponibilidade do enxofre em três extratores químicos em latossolos de Minas Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, v.6, p.125-30, 1982a.
- FONTES, M.P.F., NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V.H., BORGES, A.C. Nível Crítico de enxofre em latossolos e recuperação do sulfato adicionado por diferentes extratores químicos, em casa de vegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, v.6, p.226-30, 1982b.
- FRENEY, J.R. Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. In: TABATABAI, M.A. ed. **Sulfur in Agriculture**. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1986. p. 207-232.
- FRENEY, J. R., SPENCER, K., JONES, M.B. The diagnosis of sulphur deficiency in wheat. **Aust. J. Agric. Res.**, v.29, n.4, p.727-38, 1978.
- FRIEDRICH, J.W., SCHRADER, L.E., NORDHEIM, E.V. N deprivation in maize during grain-filling. I. Accumulation of dry Matter, Nitrate-N, and Sulfate-S. **Agron. J.**, v.71, n.3, p.461-65, 1979a.
- FRIEDRICH, J.W., SCHRADER, L.E., NORDHEIM, E.V. N deprivation in maize during grain-filling. II. Remobilization of <sup>15</sup>N and <sup>35</sup>S and relationship between N and S accumulation. **Agron. J.**, v.71, n.3, p.466-72, 1979b.
- GOH, K.M., KEE, K.K. Effects of nitrogen and sulphur fertilization on the digestibility and chemical composition of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). **Plant Soil**, v.50, n.1, p.161-167, 1978.
- GUIMARÃES, P.T.G., PONTE, A.M. da. Adubação do cafeeiro. **Inf. Agropec.**, v.4, p.20-36, 1978.
- HAAG, H.P. A nutrição mineral e o ecossistema. In: CASTRO, P.R.C., FERREIRA, S.O., YAMADA, T. eds. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba, 1987. p.49-69.
- HARON, K.B., HANSON, R.G. Sulfur supplying capacity of some Missouri soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.52, n.6, p.1657-1660, 1988.

- HOEFT, R.G., WALSH, L.M., KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.37, n.3, p.401-404, 1973.
- HUANG, W.Z., SCHOENAU, J.J., ELMY. Leaf analysis as a guide to sulfur fertilization of legumes. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.23, nos.9-10, p.1031-1042, 1992.
- ISLAM, M.M., PONNAMPERUMA, F.N. Soil and plant tests for available sulfur in wetland rice soils. **Plant Soil**, v.68, n.1, p.97-113, 1982.
- JOHNSON, G.V., FIXEN, P.E. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum, and chlorine. In: WESTERMAN, R.L. ed. **Soil Testing and Plant Analysis**. Madison, Soil Science Society of America, 1990. p.265-72.
- JONES, M.B. Plant assays for the recognition of sulphur deficiency. In: McLACHLAN, K.D. ed. **Sulphur in Australian Agriculture**. Sidney, University Press, 1975. p.175-81.
- JONES, M.B. Sulfur availability indexes. In: TABATABAI, M.A., ed. **Sulfur in Agriculture**. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin USA, 1986. p.549-566.
- KAMPRATH, E.J., JONES, U.S. Plant response to sulfur in the southeastern United States. In: TABATABAI, M.A., ed. **Sulfur in Agriculture**. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin USA, 1986. p.323-343.
- KOUNO, K., OGATA, S. Sulfur supplying capacity of soils and critical sulfur values of forage crops. **Soil Sci. Plant Nutr.**, v.34, n.3, p.327-39, 1988.
- LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado": Características, propriedades e manejo**. Instituto da Potassa , Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, Piracicaba, 1983.162p.
- MALAVOLTA, E. Nutrição mineral e adubação do cafeeiro - Passado, presente e perspectivas. In: MALAVOLTA, E., YAMADA, T. , GUIDOLIN, J.A. eds. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Instituto da Potassa , Fosfato, Piracicaba, 1983. p.138-178.
- MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B., MALAVOLTA, E., ROCHA, M., YAMADA, T. **Cultura do cafeeiro: Fatores que afetam a produtividade**. Associação Brasileira para a pesquisa da Potassa e do fosfato, Piracicaba, 1986. p.165-274.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London. Academic Press, 2<sup>a</sup> ed. 1995. 889p.
- MENGEL, K., KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Bern, Switzerland, International Potash Institute, 1987. 687 p.

- MUNIZ, A.S., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.9, p.237- 43, 1985.
- NELSON, L.E. Status and transformation of sulfur in Mississippi soils. **Soil Sci.**, v.97, n.5, p.300-306, 1964.
- NEPTUNE, A.M.L., TABATABAI, M.A., HANWAY, J.J. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some Brazilian and Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.39, p.51-55, 1975.
- NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., NEVES, J. C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F. , NOVAIS, R.F. eds. **Relação Solo-eucalipto**. Viçosa, Ed. Folha de Viçosa. 1990. p. 25-98.
- NOVAIS, R.F., NEVES, J.C.L., BARROS, N.F. **Curso de especialização por tutoria à distância - Fertilidade e manejo do solo**. Brasília: ABEAS, 1995. 133p. (módulo 7 - Fósforo)
- OZANNE, P.G., KEAY, J., BIDDISCOMBE, E.F. The comparative applied phosphate requirement of eight annual pasture species. **Aust. J. Biol. Sci.**, v.20, p.809-818, 1969.
- PEDROSO, P.A.C., VITTI, G.C., FORNASIERI FILHO, D., NADAI, O.E., GUIMARÃES, P.T.G., MELLES, C.C.A., MALAVOLTA, M.L., MALAVOLTA, E. **Efeitos de fontes e doses de enxofre em culturas de interesse econômico. IV Cafeeiro(*Coffea arabica* L.)**. São Paulo, Centro de pesquisa e promoção de sulfato de amônio, 41p. 1986.(Boletim Técnico 4)
- PINKERTON, A., RANDALL, P.J. Sulfur requirements during early growth of *Trifolium balansae*, *Trifolium subterraneum*, *Medicago murex*, and *Phalaris aquatica*. **Aust. J. Exp. Agric.**, v.35, n.2, p.199-208, 1995.
- REHM, G.W., CALDWELL, A.C. Sulfur supplying capacity of soils and the relationship to soil type. **Soil Sci.**, v.105 p.355-61, 1968.
- REISENAUER, H.M., WALSH, L.M., HOEFT, R.G. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum, and chlorine. In: WALSH, L.M., BEATON, J.D. ed. **Soil Testing and Plant Analysis**. Madison, Soil Science Society of America, 1973. p.173-199.
- REISENAUER, H.M. Soil assays for the recognition of sulphur deficiency. In: McLACHLAN, K.D. ed. **Sulphur in Australian Agriculture**. Sydney, University Press, 1975. p.182-87.
- RENNENBERG, H. The fate of excess sulfur in higher plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v.35, p.121-53, 1984.

- ROBSON, A.D., PITMAN, M.G. Interactions between nutrients in higher plants. In: LÄUCHLI, A. , BIELESKI, R.L. eds. **Inorganic plant nutrition**. Berlin, Springer-Verlag, 1983. p.147-180. (Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, 15A)
- SALISBURY, F.B., ROSS, C.W. **Plant Physiology**. 4 ed. Belmont, Wadsworth, 1992. 682p.
- SAUNDERS, W.M.H., COOPER, D.M. Evaluation of soil and plant analysis to determine sulfur status of New Zealand soils. In: McLachlan, K.D. ed. **Sulphur in Australian Agriculture**. Sidney, University Press, p. 188-95, 1975.
- SCAIFE, A., BURNS, I.G. The sulphate S/ total S ratio in plants as an index of their sulphur status. **Plant Soil**, v.91, n.1, p.61-71, 1986.
- SEKIYA, J., SCHMIDT, A., WILSON, L.G., FILNER, P. Emission of hydrogen sulfide by leaf-tissue in response to L-cysteine. **Plant Physiol.**, v.70, n.2, p.430-436, 1982.
- SIDDIQUI, M.Y., GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **J. Plant Nutr.**, v.4, n.3, p.289-302, 1981.
- SMITH, F.W., DOLBY, G.R. Derivation of diagnostic indices for assessing the sulfur status of *Panicum maximum* var. Trichoglume. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v.8, no.1, p.221-240, 1977.
- SINGH, K.P., SARKAR, A.K. Suitability of extractants and critical limit of sulphur in acidic soils for black gram. **J. Indian Soc. Soil Sci.**, v.44, n.4, p.698-701, 1996.
- SPENCER, K., FRENEY, J.R. Assessing the sulfur status of field-grown wheat by plant analysis. **Agronomy Journal**, v.72, n.3, p.469-72, 1980.
- STEWART, B.A., PORTER, L.W. Nitrogen sulphur relationships in wheat (*Triticum aestivum* L.), corn (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris*). **Agronomy Journal**, v.61, n.2, p.267-271, 1969.
- SUBBA RAO, A., GANESHAMURTHY, A.N. Soybean responses to applied phosphorus and sulphur on vertic ustochrepts in relation to available phosphorus and sulphur. **J. Indian Soc. Soil Sci.**, v.42, n.4, p.606-610, 1994.
- SUMNER, M.E. Use of dris system in foliar diagnosis of crops at high levels. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v.8 p.251-268, 1977.
- SUNARPI , ANDERSON, J.W. Effect of sulfur nutrition on sulfur redistribution in vegetative soybean plants. **Plant Physiol.**, v.112, n.2, p.623-631, 1996.

- SUNARPI, ANDERSON, J.W. Effect of nitrogen nutrition on the export of sulphur from leaves in soybean. **Plant Soil**, v.188, n.2, p.177-187, 1997.
- TABATABAI, M.A., AL-KHAFI, A.A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.44, n.5, p.1000-1006, 1980.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant Physiology**. California, Benjamin/ Cummings, 1991. 565p.
- TAN, K.H. **Environmental Soil Science**. New York, Marcel Dekker, Inc., 1994. 304p.
- TISDALE, S.L., NELSON, W.L., BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York, Macmillan Publishing Company, 1985, 754p.
- VILLANI, E.M.A., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., FONTES, L.E.F. Efeito da compactação de amostras de latossolos, de níveis de fósforo e de água sobre a difusão de fósforo. In: **Simposium da Pesquisa na UFV**, II. Linhas de Pesquisa e Resumos, Viçosa, Univ. Federal de Viçosa, p.220, 1990.
- VITTI, G.C., MALAVOLTA, E., FERREIRA, M.E. Respostas de culturas anuais e perenes à aplicação de enxofre. In: BORKERT, C.M. , LANTMANN, A.F., ed. **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina, EMBRAPA/ IAPAR/ SBCS, 1988. p. 61-85.
- VITTI, G.C. **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta**. Jaboticabal, FUNEP, 1989. 37 p.
- WATKINSON, J.H., KEAR, M.J. High performance ion chromatography measurement of sulfate in 20 mM phosphate extracts of soil. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v.25, nos.7-8, p.1015-1033, 1994.
- WILLIAMS, C.H., STEINBERGS, A. Soil sulphur fractions as chemical indices of available sulphur in some Australian soils. **Aust. J. Agr. Res.**, v.10,p.340-352, 1959.
- ZHAO, F.J., HAWKESFORD, M.J., WARRILOW, A.G.S., McGRATH, S.P., CLARKSON, D.T. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. **Plant Soil**, v.181, n.2, p.317-327, 1996.

## APÊNDICE

Quadro 1A - Análise de variância da produção de matéria seca das folhas indicadoras (MSFI), novas (MSFN), maduras (MSFM), do caule (MSCA), da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSRA) das plantas de café, cultivar Catuaí, doze meses após o transplante, cultivadas em amostras de diferentes solos

FV	GL	QUADRADO MÉDIO					
		MSFI	MSFN	MSFM	MSCA	MSPA	MSRA
Blocos	2	6,007**	28,45**	11,09**	3,78	135,96**	62,45**
Solos	11	84,67**	37,83**	272,72**	1.009**	3.739**	1.715**
Doses d/ LV <sub>h<sub>a</sub></sub>	5	4,96**	3,96**	2,90*	23,40**	46,79**	32,87**
Doses d/ LV <sub>h<sub>b</sub></sub>	5	1,40 <sup>o</sup>	0,37	2,43 <sup>o</sup>	6,04	17,94 <sup>o</sup>	13,31 <sup>o</sup>
Doses d/ LV <sub>a</sub>	5	18,89**	13,72**	20,86**	239,16**	775,31**	196,19**
Doses d/ LV <sub>b</sub>	5	14,94**	26,35**	15,62**	161,86**	603,82**	93,75**
Doses d/ LR <sub>1a</sub>	5	3,05*	1,74 <sup>o</sup>	1,56	9,87*	36,80**	51,44**
Doses d/ LR <sub>1b</sub>	5	3,54**	4,06**	1,38	10,67*	53,85**	20,05**
Doses d/ LR <sub>2a</sub>	5	2,05*	1,32	4,04**	22,13**	45,22**	33,23**
Doses d/ LE <sub>1a</sub>	5	2,28*	1,74 <sup>o</sup>	10,32**	15,23**	42,36**	91,57**
Doses d/ LE <sub>2a</sub>	5	3,29**	1,14	3,97**	18,10**	44,15**	40,17**
Doses d/ LU <sub>a</sub>	5	4,94**	0,68	2,20 <sup>o</sup>	33,04**	78,43**	34,51**
Doses d/ PV <sub>a</sub>	5	6,68**	2,27*	14,91**	16,34**	130,14**	36,25**
Doses d/ AQ <sub>a</sub>	5	3,50**	3,16**	1,92	6,34	47,36**	17,62*
Resíduo	142	0,73	0,80	1,06	4,19	7,94	5,84
CV (%)		18,33	18,71	17,88	18,09	17,79	28,26

o, \* e \*\* : Significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

Quadro 2A - Análise de variância dos teores de S disponível pelos extratores  $\text{NH}_4\text{OAc}$  e  $\text{HOAc}$  (AM-Ac),  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  em  $\text{H}_2\text{O}$  (FM-Aa) e em  $\text{HOAc}$  (FM-Ac) e das concentrações de S do solo (SSOL) e de reserva (SRES) avaliados antes do plantio do cafeeiro, cultivar Catuaí, nos diversos solos estudados

FV	GL	QUADRADO MÉDIO				
		AM-Ac	FM-Aa	FM-Ac	SSOL	SRES
Blocos	2	1,35	6,34	2,29	1,44	0,92
Solos	11	2.606**	1.078**	2.017**	8.702**	5.609**
Doses d/ LV <sub>h</sub> <sub>a</sub>	5	1.740**	3.061**	2.358**	5.893**	1.574**
Doses d/ LV <sub>h</sub> <sub>b</sub>	5	2.032**	2.546**	1.792**	5.617**	1.004**
Doses d/ LV <sub>a</sub>	5	1.572**	893**	253**	3.741**	481**
Doses d/ LV <sub>b</sub>	5	1.634**	520**	53,51**	4.805**	944**
Doses d/ LR <sub>1a</sub>	5	2.170**	574**	311**	4.341**	397**
Doses d/ LR <sub>1b</sub>	5	2.690**	425**	560**	6.855**	1.427**
Doses d/ LR <sub>2a</sub>	5	1.632**	1.530**	692**	3.401**	401**
Doses d/ LE <sub>1a</sub>	5	2.332**	665**	497**	3.680**	210**
Doses d/ LE <sub>2a</sub>	5	1.580**	542**	526**	5.203**	1.067**
Doses d/ LU <sub>a</sub>	5	1.892**	1.428**	1.313**	5.188**	918**
Doses d/ PV <sub>a</sub>	5	1.985**	2.005**	1.930**	2.338**	18,52
Doses d/ AQ <sub>a</sub>	5	2.139**	2.494**	2.147**	2.497**	25,59
Resíduo	142	2,54	4,52	3,61	14,05	17,14
CV (%)		8,15	8,90	9,85	12,34	13,41

\*\* : Significativo a 1 % de probabilidade.

Quadro 3A - Análise de variância dos teores de S total, de S-SO<sub>4</sub> e de S orgânico nas folhas indicadoras de plantas de café, cultivar Catuaí, com um ano de idade, nos diversos solos estudados

FV	GL	QUADRADO MÉDIO		
		S total	S-SO <sub>4</sub>	S orgânico
Blocos	2	0,0003	0,0006**	0,0002
Solos	11	0,0111**	0,0120**	0,0102**
Doses d/ LVh <sub>a</sub>	5	0,0030**	0,0062**	0,0011*
Doses d/ LVh <sub>b</sub>	5	0,0054**	0,0058**	0,0038**
Doses d/ LV <sub>a</sub>	5	0,0288**	0,0025**	0,0160**
Doses d/ LV <sub>b</sub>	5	0,0175**	0,0012**	0,0110**
Doses d/ LR <sub>1a</sub>	5	0,0022**	0,0020**	0,0007
Doses d/ LR <sub>1b</sub>	5	0,0041**	0,0020**	0,0009 <sup>o</sup>
Doses d/ LR <sub>2a</sub>	5	0,0150**	0,0021**	0,0089**
Doses d/ LE <sub>1a</sub>	5	0,0041**	0,0025**	0,0006
Doses d/ LE <sub>2a</sub>	5	0,0064**	0,0020**	0,0016**
Doses d/ LU <sub>a</sub>	5	0,0064**	0,0009**	0,0059**
Doses d/ PV <sub>a</sub>	5	0,0150**	0,0027**	0,0062**
Doses d/ AQ <sub>a</sub>	5	0,0091**	0,0005**	0,0054**
Resíduo	142	0,0002	0,00007	0,0004
CV (%)		9,54	19,33	11,94

o, \* e \*\* : Significativo a 10, 5 e 1 de probabilidade, respectivamente.

Quadro 4A - Análise de variância da produção de matéria seca das folhas indicadoras (MSFI), novas (MSFN), maduras (MSFM), do caule (MSCA), da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSRA), do diâmetro do caule (DIA), altura da planta (ALT) e área foliar (AF) das plantas de café, com um ano de idade, cultivares Catuaí, Icatu, Rubi, Acaiá e Mundo Novo cultivadas nos solos LR<sub>b</sub> de S. S. do Paraíso e PV<sub>a</sub> de Ponte Nova

FV	GL	QUADRADO MÉDIO								
		MSFI	MSFN	MSFM	MSCA	MSPA	MSRA	AF	ALT	DIA
Blocos	2	1,45 <sup>o</sup>	6,30**	0,52	18,55 <sup>o</sup>	40,33 <sup>o</sup>	24,95*	0,002	10,33	0,012
Solos	1	0,36	12,61**	400,65**	18,64 <sup>o</sup>	44,59 <sup>o</sup>	161,71**	0,160**	93,17**	0,006
Cultivares	4	51,06**	43,80**	46,80**	1718**	5.308**	5.873**	0,220**	1.330**	1,610**
Cultivares X Solos	4	36,78**	17,70**	73,06**	224,82**	958**	137,66**	0,061**	60,00**	0,014
Doses d/ Catuai d/LR <sub>b</sub>	5	3,54**	4,06**	1,38	10,67	53,85**	20,05*	0,002	18,50	0,069**
Doses d/ Catuai d/PV <sub>a</sub>	5	6,68**	2,27*	14,91**	16,34*	130,14**	36,32**	0,016**	17,52	0,025*
Doses d/ Icatu d/LR <sub>b</sub>	5	5,07**	9,37**	44,53**	162,16**	566,93**	28,58**	0,013**	79,15**	0,041**
Doses d/ Icatu d/PV <sub>a</sub>	5	7,79**	22,37**	5,82**	13,91 <sup>o</sup>	169,14**	1,71	0,039**	37,29**	0,029*
Doses d/ Rubi d/LR <sub>b</sub>	5	1,79 <sup>o</sup>	0,66	2,79	49,69**	76,69**	39,69**	0,004	20,61 <sup>o</sup>	0,009
Doses d/ Rubi d/PV <sub>a</sub>	5	12,37**	0,72	25,21*	65,98**	277,05**	192,05**	0,009**	3,60	0,028*
Doses d/ Acaiá d/LR <sub>b</sub>	5	0,11	9,33**	18,41**	98,81**	253,96**	10,85*	0,006*	185,15**	0,024*
Doses d/ Acaiá d/PV <sub>a</sub>	5	10,42**	30,06**	7,37*	188,82**	566,39**	66,19**	0,009**	70,19**	0,053**
Doses d/ M. Novo d/LR <sub>b</sub>	5	2,75*	11,60**	3,77*	14,82*	99,83**	6,57	0,007*	129,15**	0,074**
Doses d/ M. Novo d/PV <sub>a</sub>	5	4,61**	6,85**	13,74**	49,24**	196,29**	47,71**	0,004	106,62**	0,124**
Resíduo	118	0,66	0,92	1,38	6,44	13,14	4,18	0,002	10,75	0,010
CV (%)		10,56	13,26	13,38	16,96	17,80	20,84	11,80	6,12	10,45

o, \* e \*\* : Significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.

Quadro 5A - Análise de variância dos teores de S total e de S-SO<sub>4</sub> nas folhas indicadoras de plantas de café e das concentrações de enxofre disponível pelos extratores NH<sub>4</sub>OAc em HOAc (AM-Ac), Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em H<sub>2</sub>O (FM-Aa) e Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> em HOAc (FM-Ac), avaliados antes do plantio nos solos LR<sub>b</sub> de S. S. do Paraíso e PV<sub>a</sub> de Ponte Nova

FV	GL	QUADRADO MÉDIO				
		S total	S-SO <sub>4</sub>	AM-Ac	FM-Aa	FM-Ac
Blocos	2	0,002*	0,00005	8,26 <sup>o</sup>	2,32	23,80*
Solos	1	0,017**	0,0023**	68,83**	5569**	14.898**
Cultivares	4	0,009**	0,0025**	23,12**	92,61**	13,98
Cultivares X Solos	4	0,0008 <sup>o</sup>	0,0002**	6,92	21,42**	6,38
Doses d/ Catuai d/LR <sub>b</sub>	5	0,0041**	0,0020**	2690**	425**	560**
Doses d/ Catuai d/PV <sub>a</sub>	5	0,0150**	0,0027**	1985**	2005**	1930**
Doses d/ Icatu d/LR <sub>b</sub>	5	0,0043**	0,0003**	3225**	805**	592**
Doses d/ Icatu d/PV <sub>a</sub>	5	0,0058*	0,0005**	2535**	2373**	1761**
Doses d/ Rubi d/LR <sub>b</sub>	5	0,0093**	0,0064**	3620**	809**	390**
Doses d/ Rubi d/PV <sub>a</sub>	5	0,0050**	0,0032**	2412**	2872**	1672**
Doses d/ Acaiaá d/LR <sub>b</sub>	5	0,0071**	0,0003**	3020**	811**	508**
Doses d/ Acaiaá d/PV <sub>a</sub>	5	0,0031*	0,0008**	1759**	2420**	1818**
Doses d/ M. Novo d/LR <sub>b</sub>	5	0,0012**	0,0001**	3204**	808**	634**
Doses d/ M. Novo d/PV <sub>a</sub>	5	0,0018**	0,0006**	1782**	2229**	1882**
Resíduo	118	0,00043	0,00004	3,06	3,82	5,67
CV (%)		10,03	17,13	9,52	6,30	11,54

o, \* e \*\* : Significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.