

**NUTRIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO
TRIGO EM FUNÇÃO DE DOSES DE Mn E Cu
E EFEITOS RESIDUAIS PARA A SOJA**

NÚBIA MICHELI ZAVAGLIA PEREIRA

2010

NÚBIA MICHELI ZAVAGLIA PEREIRA

**NUTRIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRIGO EM FUNÇÃO DE
DOSES DE Mn E Cu E EFEITOS RESIDUAIS PARA A SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientadora
Profa. Dra. Janice Guedes de Carvalho

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Pereira, Núbia Micheli Zavaglia.

Nutrição e desenvolvimento do trigo em função de doses de Mn e Cu e efeitos residuais para a soja / Núbia Micheli Zavaglia Pereira.
– Lavras : UFLA, 2010.

101 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Janice Guedes de Carvalho.

Bibliografia.

1. Micronutrientes. 2. Translocação. 3. Toxidez. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.8

NÚBIA MICHELI ZAVAGLIA PEREIRA

**NUTRIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRIGO EM
FUNÇÃO DE DOSES DE Mn E Cu E EFEITOS RESIDUAIS
PARA A SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 22 de fevereiro de 2010

Dr. Álvaro Vilela de Resende	EMBRAPA MILHO E SORGO
Prof. Dr. Ruy Carvalho	UFLA
Prof. Dr. Carlos Alberto Silva	UFLA
Dra. Ana Rosa Ribeiro Bastos	UFLA

Profa. Dra. Janice Guedes de Carvalho
UFLA
(Orientadora)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

“Senhor Deus Jeová, dono do tempo e da eternidade,
Teu é o hoje e o amanhã, o passado e o futuro.
Obrigada pela vida e pelo amor, pelas flores,
pelo ar e pelo sol, pela alegria e pela dor,
pelo que foi possível e pelo o que não foi.
Ofereço-te tudo que fiz com amor.
O trabalho que pude realizar,
as coisas que passaram por minhas mãos
e o que com elas pude construir.”
Ofereço a Deus Jeová

AGRADECIMENTOS

A Deus Jeová, por me agraciar com uma família amorosa e presente em todos os momentos de minha vida: meu pai, Hélio Viane da Luz Pereira; minha mãe, Evanildes Terezinha Zavaglia Pereira e minha irmã, Mônica Juliani Zavaglia Pereira, que são os responsáveis pela conclusão deste projeto.

Aos amigos verdadeiros que fiz durante este período e que me incentivaram nessa jornada.

Aos membros da banca, Profa. Janice Guedes de Carvalho, Dr. Álvaro Vilela Resende, Prof. Ruy Carvalho, Prof. Carlos Alberto Silva e Dra. Ana Rosa Ribeiro Bastos, pela oportunidade de comparecimento e sugestões para o enriquecimento do trabalho.

Ao laboratorista Adalberto Ribeiro, pela amizade e auxílio nas análises durante o curso.

Ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar o doutorado.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	01
1 Introdução Geral	02
2 Referencial Teórico	04
2.1 Manganês.....	04
2.2 Cobre.....	11
3 Referências Bibliográficas	18
CAPITULO 2: Nutrição e desenvolvimento do trigo, em função de doses de Mn e de Cu, em latossolo vermelho-amarelo.....	27
1 Resumo	28
2 Abstract	29
3 Introdução	30
4 Material e Métodos	32
5 Resultados e Discussão	35
5.1 Resposta da cultura do trigo à aplicação de manganês e de cobre.....	35
5.1.1 Produção de matéria seca em função das doses de Mn e Cu.....	35
5.1.2 Teores de Mn na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu.....	38
5.1.3 Teores de Cu na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu.....	41
5.1.4 Coeficientes de correlação linear entre os teores de Mn e Cu e os teores dos demais nutrientes nas plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu.....	44
5.1.5 Acúmulo de Mn na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu.....	50
5.1.6 Acúmulo de Cu na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu.....	52
5.1.7 Teores de Mn no solo, em função das doses de Mn e Cu.....	55
5.1.8 Teores de Cu no solo, em função das doses de Mn e Cu.....	57
6 Conclusões	59
7 Referências Bibliográficas	60
CAPÍTULO 3: Crescimento e nutrição da soja cultivada em sucessão ao trigo, em função de doses de Mn e Cu residuais.....	64
1 Resumo	65
2 Abstract	66
3 Introdução	67
4 Material e Métodos	69

5 Resultados e Discussão	72
5.1 Resposta da cultura da soja à aplicação de manganês e de cobre.....	72
5.1.1 Produção de matéria seca em função das doses de Mn e Cu.....	72
5.1.2 Teores de Mn na matéria seca das plantas de soja, em função das doses de Mn e Cu.....	74
5.1.3 Teores de Cu na matéria seca das plantas de soja, em função das doses de Mn e Cu.....	76
5.1.4 Coeficientes de correlação linear entre os teores de Mn e Cu e os teores dos demais nutrientes nas plantas de soja, em função das doses de Mn e Cu.....	78
5.1.5 Acúmulo de Mn na matéria seca das plantas de soja, em função das doses de Mn e Cu.....	83
5.1.6 Acúmulo de Cu na matéria seca das plantas de soja, em função das doses de Mn e Cu.....	85
5.1.7 Teores de Mn residual no solo, em função das doses de Mn e Cu.	87
5.1.8 Teores de Cu residual no solo, em função das doses de Mn e Cu..	89
5.1.9 Coeficientes de correlação linear entre os teores de Mn e Cu extraídos pelo Mehlich-1 referentes ao 1º cultivo e a produção de matéria seca, teor e acúmulo de Mn e Cu nas folhas de soja (segundo cultivo), em função das doses de Mn e Cu.....	90
6 Conclusões	93
7 Referências Bibliográficas	94
ANEXOS.....	98

RESUMO

PEREIRA, Núbia Micheli Zavaglia. **Nutrição e desenvolvimento do trigo em função de doses de Mn e Cu e efeitos residuais para a soja**. 2010. 101p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Os trabalhos sobre disponibilidade de nutrientes, particularmente micronutrientes, em solos têm apresentado resultados discordantes. O objetivo geral deste trabalho foi: a) verificar a composição mineral do trigo e da soja (efeito residual) em relação à disponibilidade de manganês e de cobre em diferentes doses; b) quantificar o manganês e cobre disponíveis em solo pelo método Mehlich-1. O experimento foi conduzido em casa de vegetação. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo. As doses de Mn foram: 0,0; 1,5; 3,0 e 6,0 mg dm⁻³; e as doses de Cu foram: 0,0; 0,75; 1,5 e 3,0 mg dm⁻³, aplicadas antes do cultivo do trigo. Determinou-se o teor de todos os macronutrientes e micronutrientes. Foi avaliado o efeito das doses de Mn e Cu sobre a produção de grãos de trigo. A concentração de Mn e Cu extraível das amostras de solo foi determinada pelo método Mehlich-1. Na primeira pesquisa durante todo o desenvolvimento do trigo ocorreram sintomas de toxidez de Mn. O Mn apresentou remobilização dos tecidos mais velhos para os mais novos. O Cu foi pouco redistribuído para a casca e o grão de trigo. Os teores de Mn e de Cu no solo extraídos pelo Mehlich-1 ficaram acima do nível crítico, após o cultivo do trigo. Na segunda pesquisa o Mn apresentou remobilização dos tecidos mais velhos para os mais novos. Os teores de Mn nas folhas da soja ficaram acima da faixa de suficiência. Os teores de Cu nas folhas da soja ficaram abaixo da faixa de suficiência. Ocorreu maior acúmulo de Mn e de Cu nas folhas em relação ao caule da soja. Os teores de Mn residual no solo ficaram abaixo do nível crítico, enquanto que, os teores de Cu residuais ficaram acima do nível crítico.

* Comitê Orientador: Janice Guedes de Carvalho – UFLA (Orientadora), Álvaro Vilela Resende – EMBRAPA Milho e Sorgo, Ruy Carvalho – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA e Ana Rosa Ribeiro Bastos – UFLA.

ABSTRACT

PEREIRA, Núbia Micheli Zavaglia. **Effect of different doses of Mn and Cu on the nutrition and development of wheat and evaluation of the residual effects for soybeans.** 2010. 101p. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Work on the availability of nutrients, particularly micronutrients in soils have shown conflicting results. Objective: a) to determine the mineral composition of wheat and soybeans (residual effect) submitted to different doses of manganese and copper; b) to quantify the amount of manganese and copper available in the soil through the Mehlich-1 method. Oxisol soil was used for cultivation. Mn doses were: 0.0; 1.5; 3.0 and 6.0 mg dm⁻³; Cu doses were: 0.0; 0.75; 1.5 and 3.0 mg dm⁻³. These doses were applied before wheat was cultivated. Macronutrient and micronutrient contents were determined. The effect of the different doses of Mn and Cu on the production of wheat grains was evaluated. The concentration of Mn and Cu in the soil samples was determined through the Mehlich-1 method. The experiment was conducted in a greenhouse. In the first evaluation, during the wheat development phase, Mn toxicity symptoms were noticed. Mn presented remobilization from the older tissues to the younger. There was a small Cu redistribution to wheat husks and grains. Mn and Cu contents in the soil extracted through Mehlich-1 were above critical level, after wheat cultivation. In the second evaluation, Mn presented remobilization from the older to the younger tissues. Mn contents in the soybean leaves were above the sufficiency level. Cu contents in the soybean leaves were below the sufficiency level. There was a larger deposition of Mn and Cu in the soybean leaves than in the stems. Residual Mn contents in the soil were below critical level, whereas residual Cu contents were above critical level.

* Guidance Committee: Janice Guedes de Carvalho – UFLA (Major Professor-Adviser), Álvaro Vilela Resende – EMBRAPA Milho e Sorgo, Ruy Carvalho – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA and Ana Rosa Ribeiro Bastos – UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura brasileira passa por uma fase em que a produtividade, a eficiência, a lucratividade e a sustentabilidade dos processos produtivos são aspectos da maior relevância. Com relação aos micronutrientes, estes passaram a ser utilizados de modo rotineiro nas adubações em várias regiões e para as mais diversas condições de solo. Essa prática tem contribuído para o aumento da produtividade de grãos.

Esse aumento está relacionado com as altas demandas de nutriente nas práticas agrícolas mais intensivas e também ao cultivo de áreas marginais. Muitos fertilizantes utilizados para a correção de deficiências de micronutrientes são fontes inorgânicas solúveis em água ou produtos orgânicos solúveis, tais como quelatos sintéticos ou complexos orgânicos naturais. Os nutrientes contidos nos fertilizantes podem reagir com o solo e, conseqüentemente, ter sua disponibilidade diminuída para as plantas.

Como a maioria das plantas cultivadas apresenta problemas em solos ácidos, devido à sua sensibilidade à toxidez por alumínio e manganês, é de fundamental importância o controle da acidez do solo, reduzindo a toxidez causada por esses elementos (Vieira, 1976). Nesse sentido, a calagem está entre as práticas mais econômicas e fundamentais para a obtenção de altas produtividades (Dourado Neto & Fancelli, 2000). Além disso, segundo Foy (1976), em muitos casos, a escolha da cultivar ideal para um determinado solo pode ser mais viável economicamente do que a melhoria do solo para essa planta.

Os trabalhos sobre disponibilidade de nutrientes, particularmente micronutrientes, em solos têm apresentado resultados discordantes. Isto se deve, em grande parte, às numerosas inter-relações entre as características do solo e a

porção do nutriente tida como disponível para as culturas (Abreu & Raij, 1996; Bataglia & Raij, 1989). Tais resultados indicam a necessidade de maior refinamento das interpretações que melhor expressem a disponibilidade de micronutrientes e a resposta das plantas (Oliveira et al., 1999).

Em vista do exposto, o presente trabalho foi realizado com os objetivos gerais de: a) verificar a composição mineral do trigo e da soja (efeito residual) em relação à disponibilidade de manganês e de cobre em diferentes doses e b) quantificar o manganês e cobre disponíveis em solo pelo método Mehlich-1.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manganês

O manganês (Mn) faz parte de um grande número de minerais, nos quais ocorre como Mn^{+2} , Mn^{+3} ou Mn^{+4} , mas, o estado de oxidação +2 é o mais comum nos minerais silicatados componentes ou formadores das rochas. Tem sido demonstrado que a espécie Mn^{+2} pode, em silicatos e óxidos, substituir alguns cátions divalentes, como o Fe^{+2} e o Mg^{+2} , em suas posições (Gilkes & McKenzie, 1988). A ocorrência de Mn nos solos brasileiros é predominantemente pedogênica (Borkert et al., 2001). O manganês encontra-se no solo em concentração que varia de 20 a 3.000 $mg\ kg^{-1}$, sendo frequente a ocorrência de valores próximos de 350 $mg\ kg^{-1}$ (Malavolta, 1980).

Alguns solos não produzem efeitos tóxicos de Mn em plantas sensíveis, mesmo em pH 5,0 ou inferior, porque suas rochas-mãe contêm baixo teor de Mn em suas constituições (Foy, 1976). Solos originados de basalto contêm elevados teores de Mn, sendo de grande interesse que as cultivares mostrem tolerância a esse elemento (Camargo & Ferreira, 1992).

O Mn é absorvido principalmente como íon divalente (Mn^{2+}) e translocado, predominantemente, como cátion divalente livre no xilema, a partir da raiz, de acordo com a cinética de Michaelis-Menten (Malavolta, 1980), tendo propriedades químicas semelhantes às de metais alcalino-terrosos, como o cálcio e o magnésio, e de metais pesados, como ferro e zinco, por exemplo; por isso, esses cátions podem inibir sua absorção e transporte (Marschner, 1988). No entanto, são reconhecidos três compartimentos de Mn nas raízes. O primeiro refere-se à fração trocável, no apoplasto, onde permanece adsorvido às cargas negativas dos constituintes da parede celular. O segundo, denominado lábil, é o Mn que se encontra no citoplasma, enquanto o último, não-lábil, refere-se ao Mn

depositado nos vacúolos. Seu transporte das raízes para a parte aérea é feito como íon divalente, via xilema, seguindo a corrente transpiratória, sofrendo pouca remobilização (Mukhopadhyay & Sharma, 1991).

É um dos nutrientes que apresentam as maiores variações em termos de teor nas plantas (Mukhopadhyay & Sharma, 1991). As exigências quantitativas desse nutriente são pequenas e é bem provável que exista, nas células, mais manganês do que aquele utilizado pela planta. Por isso, devido à discrepância entre a necessidade e o teor de Mn encontrado nos tecidos vegetais, isso indica que, ao contrário da maioria dos nutrientes, a absorção de Mn é pouco regulada pela planta, o que pode levar ao acúmulo de Mn a níveis tóxicos (Clarkson, 1988).

A função mais específica do manganês nas plantas está relacionada com os processos de oxirredução; a mais estudada é a sua participação no desdobramento da molécula de água e na evolução do O₂ no sistema fotossintético na equação de Hill (Dechen et al., 1988). O manganês também atua na ativação de enzimas, na formação da clorofila e na formação, na multiplicação e no funcionamento dos cloroplastos. Além disso, atua no metabolismo do nitrogênio e nos compostos cíclicos, como precursor de aminoácidos, hormônios, fenóis e ligninas (Fageria, 2001).

As funções de ativação enzimática, biossíntese, transferência de energia e regulação hormonal são fundamentais para formação, desenvolvimento e maturação das sementes e, assim, tanto macro quanto micronutrientes apresentam importância similar nos referidos eventos. Nesse sentido, o manganês, pela sua natureza, pode estar envolvido, direta ou indiretamente, na qualidade fisiológica das sementes produzidas (Melarato et al., 2002).

O pH do solo, na maioria dos casos, é o mais importante fator de controle da disponibilidade de Mn para as plantas (Malavolta, 1980; Raij, 1991). O efeito da calagem sobre a disponibilidade se deve, principalmente, ao

incremento dos sítios de adsorção no solo, graças à existência de cargas dependentes de pH, como observado por Alloway (1990) e, por conseguinte, à densidade de cargas negativas presentes na superfície dos coloides. Portanto, para a definição da disponibilidade, é essencial conhecer como o pH influencia a distribuição de Mn entre as frações de solo. Na planta, o aumento do pH do solo resulta na elevação da concentração de Cu e Fe e na diminuição da concentração de Mn (Assmann et al., 1999).

Segundo McBride (1994), os complexos orgânicos formados com o Mn são de pouca estabilidade, uma vez que o complexo formado com o ácido húmico tem caráter inteiramente eletrostático e os ácidos fúlvicos apresentam limitado número de sítios de complexação específicos para o manganês. Esses fatos, aliados à baixa afinidade do elemento para a formação de ligações covalentes (Harter, 1991), sugerem reposição para a solução do solo mais fácil e prontamente por parte das frações orgânicas e oxídicas que a esperada no caso de micronutrientes de mais forte ligação com essas frações, como zinco e cobre (Nascimento, 2001).

Os teores de Mn aumentam com a aplicação do nutriente no solo (Moreira et al., 2006). No entanto, outro fator importante para o aumento da disponibilidade de Mn é a própria planta. A exsudação de compostos orgânicos pelas raízes, como o ácido málico, e sua oxidação podem aumentar a solubilidade de Mn pela redução de MnO_2 e posterior complexação com o Mn^{+2} formado (Jauregui & Reisenauer, 1982).

A toxicidade de Mn ocorre, frequentemente, em combinação com aquela causada pelo Al tóxico (Foy, 1976), em solos com pH inferior a 5,5 (Foy, 1976, 1984), cujo material de origem é suficientemente rico em Mn total. Entretanto, altas doses de calcário e sua má incorporação têm contribuído para a deficiência do elemento (Tanaka et al., 1992). Todavia, em solos com valores de pH acima de 5,5 o Al não prejudica o desenvolvimento das plantas, ao passo que a

toxicidade de Mn ainda pode ocorrer, particularmente quando os solos são mal drenados ou compactados (Foy, 1976, 1984).

A toxicidade de alumínio e de manganês é o fator que mais limita o desenvolvimento das plantas em solos ácidos (Carneiro et al., 2001). Os sintomas de toxicidade de manganês nas plantas são mais pronunciados nas folhas do que nas raízes, embora haja variação acentuada entre as espécies cultivadas (Soratto et al., 2005). Geralmente, ocorrem clorose marginal e franzimento das folhas, clorose nas folhas mais novas semelhante à deficiência de ferro e manchas necróticas, principalmente nas folhas mais velhas (Kohno & Foy, 1983). Em situações de severa toxicidade, as raízes assumem coloração castanha, porém, esse sintoma, geralmente, ocorre quando a parte aérea já está bastante injuriada (Soratto et al., 2005; Foy, 1976, 1984; Foy et al., 1978). Malavolta et al. (1980) encontraram, nas folhas de plantas de feijão intoxicadas por Mn, teor de 897 mg kg^{-1} , enquanto as normais apresentavam 280 mg kg^{-1} .

Segundo Foy (1983), concentrações de Mn acima de 180 mg kg^{-1} estão relacionadas com sintomas de toxicidade em plantas de soja variedade Bragg, tida como sensível. Entretanto, Jones & Nelson (1978), trabalhando com a mesma variedade, não observaram nenhum sintoma de toxicidade quando as folhas apresentavam teores de 320 mg kg^{-1} e, conforme Shuman & Anderson (1974), sintomas severos de toxicidade foram observados somente com concentrações de Mn de 720 mg kg^{-1} . Esses resultados mostram que não existe uma avaliação precisa do nível crítico de toxicidade e que a concentração de Mn deve ser utilizada com cautela no diagnóstico da toxicidade. A dificuldade para determinar, com precisão, a concentração tóxica de Mn está relacionada, entre outros fatores, com a espécie e a variedade em questão, a tolerância interna das plantas ao excesso de Mn, as interações do Mn com outros elementos na planta e a formação de complexos orgânicos (Foy, 1983).

Diversos trabalhos têm mostrado que pode existir mais de um mecanismo responsável pela tolerância ao excesso de Mn. Portanto, a tolerância de plantas à toxidez de Mn tem sido atribuída à reduzida absorção do elemento pelas raízes, à baixa translocação do excesso de Mn para a parte aérea da planta e ou à grande tolerância a altos teores de Mn nos tecidos foliares (Kohno & Foy, 1983).

Já o aparecimento de deficiência desse nutriente é favorecido por condições de solo com pH elevado (Novais et al., 1989), de solo com excesso de matéria orgânica (Mengel & Kirkby, 1982), de solo arenoso e bem drenado, pobre em Mn total ou de períodos de seca prolongados, ou ainda, de baixas temperaturas (Malavolta, 1980).

O sintoma típico de deficiência é a clorose internerval em folhas jovens, pois o manganês é pouco móvel na planta (Hocking et al., 1977). Ohki (1973) descreveu, ainda, a ocorrência de entrenós mais curtos e queda de folhas em plantas deficientes. Sob deficiência de Mn, a síntese de clorofila é grandemente afetada, tendo como consequência o amarelecimento da planta. Nessa condição, há menor produção de clorofila, resultado de poucos cloroplastos ativos fotossinteticamente ou de cloroplastos não funcionais (Homann, 1967).

Embora o Mn seja considerado, de modo geral, como de baixa mobilidade no floema da planta (Mengel & Kirkby, 1982), Ohki et al. (1979) verificaram translocação do Mn de tecidos mais velhos para os mais novos. Assim, conforme Ohki et al. (1979), podem-se observar plantas com sintomas de clorose internerval em todas as folhas, mas mudanças ambientais, de potencial-redox ou de pH em diferentes camadas de solo, podem levar ao desenvolvimento de um verde normal em folhas mais novas, formadas depois das mudanças que levaram a uma maior disponibilidade de Mn no solo.

Outro fator importante relacionado à deficiência de Mn é a própria planta, ou seja, diferentes espécies e/ou cultivares podem diferir grandemente na

composição mineral, embora crescendo sob condições semelhantes (Abreu et al., 1994).

As fontes com sulfato de manganês e óxido de manganês são eficientes em corrigir deficiências de manganês no solo, embora doses mais elevadas sejam necessárias quando se usa o óxido de manganês. O sulfato de manganês proporciona maior incremento no teor de manganês na planta (Abreu et al., 1996).

Com relação ao efeito residual, Reuter et al. (1988) comentam que, embora o efeito residual do Mn aplicado em solos neutros a alcalinos sob condições de casa de vegetação possa ser apreciável, no campo este efeito é bastante limitado. Os autores atribuem isso a uma rápida reversão dos sais de manganês para formas menos disponíveis, o que pode resultar em falhas para corrigir uma deficiência aguda de manganês, mesmo no ano de aplicação. A reversão também resulta em baixas recuperações do manganês aplicado pelas plantas e, progressivamente, diminui as concentrações de manganês extraível no solo. A reversão é atribuída ao “envelhecimento” de compostos de manganês e à formação de superfícies mais ordenadas e menos ativas, as quais restringem a habilidade das raízes em dissolver e absorver o manganês. Por outro lado, o efeito residual do Mn aplicado em solos arenosos mais ácidos pode ser considerável, embora o aumento na produção e a absorção de manganês normalmente não correspondam àquelas obtidas a partir de aplicações correntes de manganês (Gettier et al., 1984).

A pesquisa sobre a avaliação da disponibilidade de manganês em solos tem, frequentemente, apresentado resultados discordantes, em grande parte, em decorrência das diferenças nos teores considerados “disponíveis” pelos diversos extratores e suas relações com características dos solos e formas químicas em que se encontra o elemento. Mesmo assim, soluções vêm sendo testadas para

extrair o Mn do solo, incluindo água, extratores ácidos, sais, quelantes e redutores (Abreu et al., 1994).

De acordo com Lindsay & Cox (1985), os níveis de Mn na solução do solo são geralmente muito baixos, o mesmo ocorrendo com as quantidades adsorvidas nos sítios de troca. Por este motivo, a maioria das soluções extratoras usadas na extração de Mn do solo contém ácidos, bases, complexantes ou quelatos que também dissolvem parte dos sólidos na fase lábil. No caso dos solos caulíníticos altamente intemperizados e ácidos, os mesmos autores observaram que a utilização de uma solução extratora mais forte, tamponada a valores mais baixos de pH, projetada para simular o ambiente das plantas que se desenvolvem em solos ácidos, seria o mais recomendável.

As soluções ácida (Mehlich-1) e mista (ácida/quelante - Mehlich-3) extraem mais Mn que as quelantes (AB-DTPA e DTPA) (Abreu et al., 2004; Moreira et al., 2006). A maior extração pelas soluções, ácida e mista, pode ser devido à sua maior capacidade em solubilizar o Mn ligado aos óxidos de Fe (Abreu et al., 2004). Apesar de o EDTA presente no Mehlich-3 ser mais eficiente na complexação do Mn em condições alcalinas do que em condições ácidas (Norvell, 1991). Nesse caso, sua capacidade de quelação, aliada à acidez ($\text{pH} \cong 2,4$), foi mais importante do que a maior acidez do Mehlich-1 ($\text{pH} \cong 1,2$). Mehlich (1984) também observou em solos norte-americanos que o Mehlich-3 extraiu maiores quantidades de Mn do que o Mehlich-2, o qual não continha EDTA em sua composição.

A quantificação da disponibilidade de manganês para as plantas tem sido difícil, em vista, entre outros aspectos, da dificuldade de reprodução, em laboratório, das condições de campo. Várias soluções extratoras (ácidas, sais e quelatos) são continuamente testadas, a fim de se encontrar uma que seja mais eficiente em simular a absorção de manganês pelas plantas (Rosolem et al., 1992; Abreu et al., 1994). Os métodos que empregam a solução de DTPA e de

Mehlich-1 são os mais adotados no Brasil, apesar de não existir, dentre esses, uma definição clara a respeito do melhor extrator (Abreu et al., 1996).

2.2 Cobre

Nos solos, o cobre (Cu) aparece em quantidades variáveis, dependendo, em grande parte, da natureza da rocha da qual se originou, com quantidades que variam de 2 a 100 mg kg⁻¹. O cobre ocorre como sulfetos que se intemperizam, liberando o íon Cu⁺² e seus complexos. O cobre no solo é adsorvido por óxidos de ferro, alumínio e manganês e pode estar na forma complexada, sendo os complexos orgânicos formados relativamente mais abundantes que os inorgânicos. Os ácidos orgânicos formam complexos solúveis e insolúveis, e o ácido húmico liga-se mais fortemente que o fúlvico com o íon cobre e tem implicações importantes nos mecanismos pelo qual o cobre é mantido em forma solúvel no solo. Os complexos formados com os ácidos fúlvicos, pelo fato de estes apresentarem maior acidez e menor peso molecular, são mais solúveis. Em baixas concentrações, o cobre é imobilizado pelos ácidos húmicos (Camargo, 1988).

O cobre é um elemento essencial para o crescimento das plantas, sendo conhecido por desempenhar importante papel na nutrição mineral, na bioquímica e na fisiologia das plantas (Malavolta, 1980; Haque et al., 1993). Participa de diversos processos metabólicos nas plantas e tanto a deficiência (Haque et al., 1993; Marschner, 1995) quanto a toxidez de cobre (Lindon & Henriques, 1991; Moocqot et al., 1996) ocasionam redução da taxa fotossintética.

Nas plantas, o cobre tende a acumular-se nas raízes. Sua mobilidade é restrita, mas, pelo menos em parte, pode sair das folhas velhas para as mais novas. Tanto na seiva bruta quanto na elaborada, o Cu está em forma orgânica, provavelmente quelatizado por aminoácidos. A mobilidade depende do teor no tecido, ou seja, em plantas bem nutridas, vai com facilidade até os grãos,

enquanto nas deficientes o movimento é mais difícil. O transporte no floema parece ocorrer com facilidade, visto que a deficiência pode ser corrigida mediante aplicações foliares de produtos contendo o elemento. A toxidez se manifesta primeiramente nas raízes, que escurecem e perdem elementos previamente absorvidos, o que indica comprometimento da permeabilidade das membranas (Malavolta et al., 1997). Ocorrem também peroxidação dos lipídios das membranas dos cloroplastos e inibição do transporte de elétrons na fotossíntese. Podem também ocorrer atraso na germinação de sementes e redução do desenvolvimento de raízes e mudas (Kabata-Pendias & Pendias, 2000).

Estudos toxicológicos envolvendo o cobre em diversos ambientes mostram que as formas dominantes são de íon metálico livre e outras formas combinadas (Neubecker & Allen, 1983). Tais estudos mostram também que a toxicidade e a biodisponibilidade estão relacionadas com a atividade do metal livre (hidratado) e não com a concentração total do metal.

O Cu tem sua solubilidade afetada pelo pH e pela calagem. Valores de pH acima de 6,0 podem induzir à deficiência do nutriente, pois ocorre a precipitação como hidróxido de Cu (McBride et al., 1997). Em solos argilosos, o Cu é fortemente retido, principalmente pela ligação específica com grupos OH octaedral em argilas silicatadas, nas faces quebradas, em aberturas e em defeitos na estrutura cristalina, agravando ainda mais a sua deficiência (Ellis & Knezek, 1972).

Bayer & Mielniczuk (1999) comentam que a complexação (quelação) de Cu, entre outros nutrientes, por ácidos orgânicos de baixo peso molecular, aumenta a sua disponibilidade, pois o quelato torna-se numa forma lábil desses elementos. Quelatos de baixo peso molecular, normalmente formados por Cu^+ e ácidos fúlvicos, por serem mais solúveis, disponibilizam o nutriente mais facilmente. A meia-vida muito curta do quelato, decorrente da rápida

decomposição do composto orgânico pelos microrganismos, resulta na liberação de forma contínua e gradativa dos micronutrientes para as plantas. A produção permanente de ácidos orgânicos pela atividade microbiana e rizosfera resulta na complexação novamente dos micronutrientes não absorvidos (Bayer & Mielniczuk, 1999). Por outro lado, é preciso considerar que, em solos com elevado teor de matéria orgânica, como os orgânicos, a adsorção de micronutrientes catiônicos, principalmente do cobre, pode ser tão intensa a ponto de causar deficiência, tal como apontado por Galvão & Souza (1985) ao avaliarem a resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico.

Para Lopes & Carvalho (1988), de 0,5 a 0,8 mg dm⁻³ de Cu (Mehlich-1) constitui a faixa crítica desse nutriente para os solos de cerrado. Para Galvão (1999), os níveis críticos de cobre no solo, para os extratores HCl 0,1 mol L⁻¹, Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA, são de 0,6, 0,5, 0,5 e 0,6 mg dm⁻³, respectivamente.

Segundo Jones Júnior (1973), uma concentração normal de Cu na folha de soja seria de 5-20 mg kg⁻¹ de Cu, enquanto para Trani et al. (1983), o nível crítico de Cu seria de 10 mg kg⁻¹. No entanto, Malavolta et al. (1989) sugerem, como faixa de suficiência, de 10 a 30 mg kg⁻¹ de Cu.

Segundo Galvão & Sousa (1985), na literatura não há menção sobre teores de suficiência de macro e micronutrientes no grão de trigo, mas, conforme citação de Graham & Nambiar (1981), o nível crítico de cobre no grão é de 2,5 mg kg⁻¹. Galvão & Sousa (1985) não encontraram efeito dos tratamentos nos teores de cobre do grão. Nambiar (1976), avaliando a resposta de genótipos de trigo à aplicação de cobre, verificou que somente quando a deficiência era muito acentuada, a ponto de causar grandes reduções na produção de grãos, é que, em alguns genótipos, a concentração de cobre no grão das plantas deficientes era menor do que nas plantas normais. Nos casos em que a deficiência de cobre não

é tão acentuada, não há efeito dos tratamentos na concentração de cobre no grão (Galvão & Souza, 1985).

A resposta ao cobre, mais acentuada em trigo do que em outras culturas anuais (Graham & Nambiar, 1981), tem sido explicada de diferentes maneiras. Graham (1975) constatou, por meio de experimentos com polinização cruzada, que a deficiência de cobre no trigo causa a esterilidade masculina (chochamento), isto é, o pólen proveniente de uma planta deficiente em cobre não fecunda o óvulo de uma planta normal; já o pólen proveniente de uma planta normal é capaz de fecundar tanto o óvulo de uma planta normal como o de outra deficiente.

Na revisão de Graham & Nambiar (1981), é mencionado que a esterilidade masculina, dependendo da sua intensidade, pode causar no trigo reduções de 50% a 100% na produção de grãos. Galvão & Sousa (1985) constataram que a menor produção de trigo na testemunha em relação aos outros tratamentos deveu-se, em parte, à sua maior suscetibilidade à esterilidade masculina, causada pela deficiência de cobre, cujo teor na folha de $3,3 \text{ mg kg}^{-1}$ estava abaixo da concentração normal ($5\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$) sugerida por Jones Júnior (1973). Esse fato foi confirmado após a aplicação de cobre, quando a esterilidade masculina, que era de 18,4% na testemunha, reduziu para aproximadamente 4,4%, com aumento médio na produção de grãos de 988 kg ha^{-1} . No entanto, a interpretação baseada em tabelas que determinam a concentração normal de nutrientes em plantas, é apenas uma indicação geral do estado nutricional. Segundo Munson & Nelson (1973), muitas variáveis influenciam a composição mineral da folha, como época de amostragem, tipo de folha, cultivar, condições de solo (fertilidade, umidade, temperatura) e clima.

A deficiência de cobre, logo após o enchimento de grãos, também faz com que as espigas de trigo se apresentem viradas em direção ao solo. Esse sintoma é uma indicação de deficiência moderada de cobre no solo, causado pela

produção insuficiente de lignina (Graham & Nabiar, 1981). Presume-se, portanto, que o aumento na produção de grãos, causado pela aplicação do cobre, se deva à sua ação na redução da esterilidade masculina como também no aumento ou no fortalecimento da parte vegetativa da planta (Galvão, 1988).

A toxicidade do elemento às plantas ocorre mais intensamente em solos ácidos, devido à presença da forma livre (Cu^{+2}) mais disponíveis à absorção radicular. Apesar das dificuldades encontradas no processo de avaliação da concentração de diversas formas do metal no solo, é necessário conhecê-la para relacionar as frações existentes com a disponibilidade e com a toxicidade às plantas (Gimenez et al., 1992).

Galvão (1999) obteve, no segundo e no terceiro cultivo, rendimentos máximos de grãos de soja, independentemente dos métodos usados na aplicação do cobre, ou seja, no solo (lanço e sulco), na folha e na semente. O cobre aplicado ao solo na forma de sulfato mostrou prolongado efeito residual (Galvão, 1988).

Volkweiss (1988) comenta que o efeito residual de cobre é, em geral, bastante pronunciado, podendo durar até oito anos, dependendo da dose aplicada e do tipo de solo. Conforme Martens & Westermann (1991), existem evidências de que a reversão de fontes de Cu para formas não disponíveis para as plantas é baixa. Os intervalos para novas aplicações de Cu podem ser superiores a cinco anos, dependendo da sensibilidade das culturas e da severidade da deficiência.

Quanto aos extratores para estimar a disponibilidade do cobre, os mais usados em estudos no exterior têm sido o HCl 0,1 mol L⁻¹, o Mehlich-1, o Mehlich-3 e o DTPA (Sims & Johnson, 1991) e, no Brasil, além desses, o Na₂EDTA (Bataglia & Raij, 1989; Abreu et al., 1996). Por outro lado, inexistem trabalhos de calibração de extratores de cobre em solos de cerrado para a cultura da soja e do trigo (Galvão, 1999).

Deficiência e excesso de micronutrientes têm sido diagnosticados a campo e por meio das análises de solo e de tecido vegetal. O Mehlich-1 é uma opção de extrator nos laboratórios porque se pode aproveitar o mesmo extrato utilizado na análise de fósforo e potássio, para determinar também os micronutrientes (Silva et al., 2003).

As soluções extratoras Mehlich-1 e DTPA são as mais utilizadas nos laboratórios de análise de solo do Brasil (Silva et al., 2003), embora o DTPA tenha sido desenvolvido para solos mais alcalinos (Lindsay & Norvell, 1978), que não correspondem à maioria dos solos brasileiros, cuja principal característica é a acidez.

Segundo Galvão & Souza (1985), os teores de cobre solúveis nos extratores obedecem à seguinte ordem decrescente: DTPA, Mehlich-3, HCl e Mehlich-1. Presume-se que o DTPA tenha extraído mais cobre que o Mehlich-3 por possuir um agente complexante mais concentrado ($0,005 \text{ mol L}^{-1}$ de DTPA) do que o usado no Mehlich-3 ($0,001 \text{ mol L}^{-1}$ de EDTA), enquanto o HCl $0,1\text{N}$ extraiu mais cobre do que o Mehlich-1 por ser o seu extrato mais ácido ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de H^+) em relação ao Mehlich-1 ($0,075 \text{ mol L}^{-1}$ de H^+). As maiores quantidades de cobre extraídas pelo DTPA e pelo Mehlich-3 facilitam a sua determinação no extrato e minimizam os erros devido à contaminação. Por outro lado, as pequenas quantidades de cobre extraídas pelo HCl e Mehlich-1 são difíceis de se determinar com precisão e qualquer contaminação, por menor que seja, pode ter grande efeito na interpretação dos resultados (Galvão & Sousa, 1985).

Apesar de os extratores HCl, Mehlich-3 e DTPA terem mostrado alto grau de associação com as doses de cobre, eles apresentaram baixo grau de associação com a produção de grãos. Isso ocorre porque não houve diferença significativa na produção de grãos, entre os tratamentos que receberam cobre, ao passo que os teores de cobre extraídos pelos métodos variaram de acordo com os

tratamentos. Já o Mehlich-1, normalmente usado em laboratório de rotina, apresentou baixa capacidade de diferenciação entre as doses de cobre aplicadas ao solo (Galvão & Sousa, 1985).

Percebe-se que há muitas controvérsias quanto ao extrator ideal para prever a disponibilidade de micronutrientes em solos para as culturas de trigo e soja, devido, principalmente, aos poucos estudos envolvendo correlação e calibração. Nesse contexto, a complexidade do sistema solo-planta representa, provavelmente, o fator impeditivo mais importante ao desenvolvimento de pesquisas do gênero. É razoável supor, portanto, que os objetivos deste trabalho, focados na disponibilidade dos micronutrientes Mn e Cu em plantas de trigo e soja, irão contribuir para agregar novos conhecimentos à dinâmica dos micronutrientes.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; NOVAIS, R. F.; RAIJ, B. van; RIBEIRO, A. C. Comparação de métodos para avaliar a disponibilidade do manganês em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 18, p. 81-90, 1994.

ABREU, C. A.; RAIJ, B. van. Efeito da reação do solo no zinco extraído pelas soluções de DTPA-TEA e Mehlich-1. **Bragantia**, Campinas, v. 55, p. 357-363, 1996.

ABREU, C. A.; RAIJ, B. van; ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Efficiency of multinutrient extractants for the determination of available copper in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, p. 763-771, 1996.

ABREU, C. A.; RAIJ, B. van; ABREU, M. F.; GONZALEZ, A. P. Avaliação da disponibilidade de manganês e ferro em solos pelo uso do método modificado da resina de troca iônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 579-584, 2004.

ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soils. In: _____. (Ed). **Heavy metals in soils**. New York: J. Wiley, 1990. p. 29-39.

ASSMANN, T. S.; PREVEDELLO, B. M. S.; REISSMANN, C. B.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Potencial de suprimento de micronutrientes de calcário oriundo da mineração de folhelho pirobetuminoso da formação Irati-PR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 363-969, 1999.

BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. van. Eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, p. 205-212, 1989.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. dos; CAMARGO, F. A. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-23.

BORKERT, C. M.; PAVAN, M. A.; BATAGLIA, O. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/Potafós, 2001. p. 151-185.

CAMARGO, C. E. O.; FERREIRA, A. W. P. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de manganês em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 3, p. 417-422, 1992.

CAMARGO, O. A. de. Micronutrientes no solo. In: SIMPÓSIO SOBRE MICRONUTRIENTES NA AGRICULTURA, 1., 1988, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: UNESP, 1988. p. 103-120.

CARNEIRO, J. P.; VARENNES, A.; AMANTE, H. Manganese toxicity in three species of annual medicis. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 12, p. 1957-1964, 2001.

CLARKSON, D. T. The uptake and translocation of manganese by plant roots. In: GRAHAM, R. D.; HANNAM, R. J.; UREN, N. C. (Ed.). **Manganese in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988. p. 101-111.

COX, F. R. Development of a yield response prediction and manganese soil test interpretation of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, p. 521-524, 1968.

DECHEN, A. R.; HAAG, H. P.; CARMELLO, Q. A. de C. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE MICRONUTRIENTES NA AGRICULTURA, 1., 1988, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: UNESP, 1988. p. 65-75.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. p. 386.

ELLIS, B. G.; KNEZEK, B. D. Adsorption reactions of micronutrientes in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Wisconsin: Soil Science Society of America, 1972. p. 59-78.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 6, p. 1269-1290, 2001.

FOY, C. D. General principles involved in screening plants for aluminum and manganese tolerance. In: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, Beltsville, 1976. **Proceedings...** Ithaca: Cornell University, 1976. p. 255-267.

FOY, C. D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acids soil. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acity and liming**. 2. ed. Madison: American Society Agronomy, 1984. p. 57-97.

FOY, C. D. The physiology of plant adaptation to mineral stress. **Iowa State Journal of Research**, Iowa, v. 57, n. 4, p. 355-391, 1983.

FOY, C. D.; CHARNEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.

GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, p. 335-350, 1983.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num latossolo vermelho-amarelo franco-argilo-arenoso fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 265-272, 1999.

GALRÃO, E. Z. Níveis críticos de Zn para o milho cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 255-260, 1995.

GALRÃO, E. Z. Resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico de várzea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 12, p. 275-279, 1988.

GALRÃO, E. Z.; SOUSA, D. M. D. de. Resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 9, p. 149-153, 1985.

GARVIN, D. F.; WELCH, R. M.; FINLEY, J. W. Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentrations of US hard red winter wheat germplasm. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 86, n. 13, p. 2213-2220, 2006.

GETTIER, S. W.; MANTENS, D. C.; HALLOCK, D. L.; STEWART, M. J. Residual Mn and associated soybean yield response from MnSO₄ application on sandy loam soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 81, n. 1, p. 101-110, 1984.

GILKES, R. J.; MCKENZIE, R. M. Geochemistry and mineralogy of manganese in soils. In: GRAHAM, R. D.; HANNAM, R. J.; UREN, N. C. (Ed.). **Manganese in soils and plants**. Australia: Kluwer Academic, 1988. p. 23-35.

GIMENEZ, S. M. N.; CHAVES, J. C. D.; PAVAN, M. A.; CRUCES, I. I. Toxicidade de cobre em mudas de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 16, p. 361-366, 1992.

GRAHAM, R. D. Male sterility in wheat plants deficient in copper. **Nature**, London, v. 254, p. 514-515, 1975.

GRAHAM, R. D.; NAMBIAR, E. K. S. Advances in research on copper deficiency in cereals. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 32, p. 1009-1037, 1981.

HAQUE, I.; ADUAYI, E. A.; SIBANDA, S. Copper in soils, plants, and ruminant animal nutrition with special reference to sub-Saharan Africa. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 11, p. 2149-2212, 1993.

HARTER, R. D. Micronutrient adsorption-desorption reactions in soils. In: MORTVERDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in the agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 59-88.

HOCKING, P. J.; PATE, J. S.; WEE, S. C.; MCCOMB, A. J. Mn nutrition of Lupins spp. especially in relation to developing seeds. **Annals of Botany**, London, v. 41, p. 677-688, 1977.

HOMANN, P. H. Studies on the manganese of the chloroplast. **Plant Physiology**, Bathesda, v. 42, n. 2, p. 997-1007, 1967.

JAUREGUI, M. A.; REISENAUER, H. M. Dissolution of oxides of manganese and iron by root exudate components. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 314-317, 1982.

- JONES JUNIOR, J. B. Plant tissue analysis for micronutrients. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p. 319-346.
- JONES, W. F.; NELSON, L. E. Response of field grown soybeans to lime. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9, n. 7, p. 606-614, 1978.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC, 2000. 413 p.
- KOHNO, Y.; FOY, C. D. Manganese toxicity in bush bean as affected by concentration of manganese and iron in the nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 6, n. 5, p. 363-386, 1983.
- LIDON, F. C.; HENRIQUES, F. S. Limiting step on photosynthesis of Rice plants treated with varying copper levels. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 138, p. 115-118, 1991.
- LINDSAY, W. L.; COX, F. R. Micronutrients soil testing for tropics. In: VLEK, P. L. G. (Ed.). **Micronutrients in tropical food crop production: developments in plant and soil sciences**. Dordrecht: M. Nijhoff, 1985. p. 169-200.
- LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 421-427, 1978.
- LOPES, A. S.; CARVALHO, J. G. Micronutrientes: critérios de diagnose para solo e planta, correção de deficiências e excessos. In: BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F. (Ed.). **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina: EMBRAPA/ IAPAR/SBCS, 1988. p. 133-178.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. Mechanisms of manganese acquisition by roots from soils. In: GRAHAM, R. D.; HANNAM, R. J.; UREN, N. C. (Ed.). **Manganese in soils and plants**. Australia: Kluwer Academic, 1988. p. 191-204.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic, 1995. 889 p.

MARTENS, D. C.; WESTERMANN, D. Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 549-591.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1994. 406 p.

MCBRIDE, M. B.; SAUVE, S.; HENDERSHOT, W. Solubility control of Cu, Zn, Cd and in contaminated soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 379-386, 1997.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 15, p. 1409-1416, 1984.

MELARATO, M.; PANOBIANCO, M.; VITTI, G. C.; VIEIRA, R. D. Manganês e potencial fisiológico de sementes de soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 1069-1071, 2002.

MENGEL, K.; KIRKIBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Switzerland: Internantional Potash Institute, 1982. 655 p.

MOCQUOT, B.; VANGRONVELD, J.; CLIJSTERS, H.; MENCH, M. Cooper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. **Plant and Soil**, The Hague, v. 182, n. 2, p. 287-300, 1996.

MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; KIEHL, J. C.; MARTIN NETO, L.; PAULETTI, V. Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 121-136, 2006.

MUKHOPADHYAY, M. J.; SHARMA, A. Manganese in cell metabolism of higher plants. **Botanical Review**, Bronx, v. 57, p. 117-149, 1991.

MUNSON, R. D.; NELSON, W. L. Principles and practices in plant analysis. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 2. ed. Madison: American Society Agronomy, 1973. p. 223-248.

NAMBIAR, E. K. S. Genetic differences in the copper nutrition of cereals. II. Genotypic differences in response to copper in relation to copper, nitrogen, and other mineral contents of plants. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 27, p. 465-477, 1976.

NASCIMENTO, C. W. A. **Dessorção, extração e fracionamento de zinco, cobre e manganês em solos**. 2001. 60 p. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NEUBECKER, T. A.; ALLEN, H. E. The measurement of complexation capacity na conditional stability constants for Ligands in natural waters. **Water Research**, New York, v. 17, p. 1-14, 1983.

NORVELL, W. A. Reactions of metal chelates in soils and nutrient solutions. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 187-228.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; SEDYAMA, T. Deficiência de Mn em plantas de soja cultivadas em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, n. 1, p. 199-204, 1989.

OHKI, K. Manganese nutrition of cotton under two boron levels. I. Growth and development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 482-485, 1973.

OHKI, K.; BOWELL, F. C.; PARKER, M. B.; SHUMAN, L. M.; WILSON, D. O. Critical manganese deficiency level of soybean related to leaf position. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 233-234, 1979.

OLIVEIRA, M. F. G.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; VASCONCELLOS, C. A.; ALVES, V. M. C. Relação entre o zinco “disponível”, por diferentes extratores, e as frações de zinco em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 827-836, 1999.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos/Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

REUTER, D. J.; ALSTON, A. M.; MCFARLANE, J. D. Occurrence and correction of manganese deficiency in plants. In: GRAHAM, R. D.; HANNAM, R. J.; UREN, N. C. (Ed.). **Manganese in soils and plants**. Australia: Kluwer Academic, 1988. p. 205-218.

ROSOLEM, C. A.; BESSA, M. A.; AMARAL, P. G. do; PEREIRA, H. F. M. Manganês no solo, sua avaliação e toxidez de manganês em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 2. p. 277-285, 1992.

SHUMAN, L. M.; ANDERSON, O. E. Evaluation of six extractants for their ability to predict manganese concentrations in wheat and soybeans. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 38, p. 788-790, 1974.

SILVA, M. A. G.; MUNIZ, A. S.; MATA, J. D. V.; CEGANA, A. C. V. Extratores para a quantificação do zinco e do cobre em solos cultivados com soja. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 361-366, 2003.

SIMS, J. T.; JOHNSON, G. V. Micronutrients soil tests. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 427-476.

SORATTO, R. P.; SILVA, T. R. B. da; BORGHI, E.; SILVA, L. M. da; ROSOLEM, C. A. Resposta de quatro cultivares de feijão ao manganês em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 2, p. 235-240, 2005.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; BULISANI, E. A. Deficiência de manganês em soja induzida por excesso de calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 247-250, 1992.

TRANI, P. E.; HIROCE, R.; BATAGLIA, O. C. **Análise foliar**: amostragem e interpretação. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 18 p.

VIEIRA, C. **Cultura do feijão**. Viçosa, MG: UFV, 1976. 120 p.

VOLKWEISS, S. J. Fontes e métodos de aplicação de micronutrientes. In: SIMPÓSIO SOBRE MICRONUTRIENTES NA AGRICULTURA, 1988, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: UNESP, 1988. v. 2, p. 635-663.

CAPÍTULO 2

NUTRIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRIGO, EM FUNÇÃO DE DOSES DE Mn E DE Cu, EM LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO

1 RESUMO

Os solos da região dos cerrados, de modo geral, são deficientes em micronutrientes. O presente trabalho teve como objetivo: a) verificar a composição mineral do trigo em relação à disponibilidade de manganês e de cobre; b) identificar o efeito imediato desses nutrientes para essa cultura; c) quantificar o manganês e cobre disponíveis no solo, por meio do extrator Mehlich-1. O experimento foi conduzido em casa de vegetação. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo. As doses de Mn foram: 0,0; 1,5; 3,0 e 6,0 mg dm⁻³; e as doses de Cu foram: 0,0; 0,75; 1,5 e 3,0 mg dm⁻³. No estágio 49 determinou-se o teor de todos os macronutrientes e micronutrientes. Nas plantas remanescentes foi avaliado o efeito das doses de Mn e Cu sobre a produção de grãos. A concentração de Mn e Cu extraível das amostras de solo foi determinada pelo método Mehlich-1. Durante todo o desenvolvimento do trigo ocorreram sintomas de toxidez de Mn. O Mn apresentou remobilização dos tecidos mais velhos para os mais novos. O Cu foi pouco redistribuído para a casca e o grão de trigo. Os teores de Mn e de Cu no solo extraídos pelo Mehlich-1 ficaram acima do nível crítico, após o cultivo do trigo.

2 ABSTRACT

The soils of the Cerrado region, in general, are deficient in micronutrients. Objective: a) to determine the mineral composition of wheat in relation to manganese and copper availability; b) to identify the immediate effect of these nutrients on the culture; c) to quantify manganese and copper availability in the soil through the Mehlich-1. The experiment was conducted in a greenhouse. Oxisol soil was used for cultivation. Mn doses were: 0.0, 1.5, 3.0 and 6.0 mg dm⁻³, and Cu doses were: 0.0, 0.75, 1.5 and 3.0 mg dm⁻³. All macronutrients and micronutrients were determined in stage 49. In the remaining plants, the effect of Mn and Cu doses on the grain yield was evaluated. Mn and Cu concentrations in the soil samples were determined through Mehlich-1. Symptoms of Mn toxicity were observed throughout the development of the wheat. Mn showed remobilization from the older to the younger tissues. Cu was just redistributed to wheat husks and the grains. Mn and Cu contents in the soil extracted through Mehlich-1 were above the critical level, after wheat cultivation.

3 INTRODUÇÃO

O trigo é um dos mais importantes grãos para a humanidade, não somente pela área cultivada, como também pela produção e proporção no comércio mundial de grãos, além de fornecer grande parte da proteína e amido necessários à dieta humana (Federizzi et al., 1999). O trigo cultivado no Brasil pertence à família Poaceae e gênero *Triticum*, apresentando diversas espécies (Federizzi et al., 1999) e tem sua origem na Ásia e no Oriente Médio. A espécie *Triticum aestivum* L. (o tipo de maior interesse comercial) é utilizada na panificação, na produção de bolos e em produtos de confeitaria.

Alguns solos não produzem efeitos tóxicos de Mn^{2+} em plantas sensíveis, mesmo em pH 5,0 ou inferior, porque suas rochas-mães contêm baixo teor de Mn^{2+} em sua constituição (Foy, 1976). Áreas de solos originários de basalto apresentam elevados teores de Mn^{2+} , sendo de grande interesse que as cultivares mostrem tolerância a esse elemento (Camargo et al., 1995).

Para o cultivo dos solos ácidos é necessário aplicar calcário, visando elevar o pH e a saturação por bases. A elevação do pH tem influência direta na redução da toxidez de alumínio e pode alterar a disponibilidade de nutrientes no solo para as plantas (Azevedo et al., 1996). Tanto o Cu quanto o Mn têm sua solubilidade afetada pelo pH e pela calagem. Valores de pH acima de 6,0 podem induzir à deficiência desses nutrientes (McBride et al., 1997).

Os solos da região dos cerrados, de modo geral, são deficientes em micronutrientes. O cobre é um elemento essencial para o crescimento das plantas, sendo conhecido por desempenhar importante papel na nutrição mineral, bioquímica e fisiologia das plantas (Malavolta, 1980). O manganês também atua na ativação de enzimas, na formação da clorofila e na formação, multiplicação e funcionamento dos cloroplastos. Além disso, atua no metabolismo do nitrogênio

e nos compostos cíclicos, como precursor de aminoácidos, hormônios, fenóis e ligninas (Fageria, 2001).

Deficiência e excesso de micronutrientes têm sido diagnosticados em campo e por meio das análises de solo e de tecido vegetal. O Mehlich-1 é uma opção de extrator nos laboratórios porque se pode aproveitar o mesmo extrato utilizado na análise de fósforo e potássio para determinar também os micronutrientes (Silva et al., 2003).

Em vista do exposto, o presente trabalho teve como objetivos: a) verificar a composição mineral do trigo em relação à disponibilidade de manganês e de cobre; b) identificar o efeito imediato desses nutrientes para essa cultura e c) quantificar o manganês e cobre disponíveis no solo, por meio do extrator Mehlich-1.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (DCS/UFLA), em Lavras, MG, utilizando um Latossolo Vermelho-Amarelo (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 1999) de textura muito argilosa, proveniente do campus da UFLA. O solo foi peneirado, homogeneizado, secado ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm de abertura. As características químicas originais deste solo são: pH (H₂O)= 5,6; MO= 1,5 dag kg⁻¹; P (Mehlich-1)= 0,4 mg dm⁻³; K (Mehlich-1)= 14 mg dm⁻³; Ca (KCl 1M)= 0,5 cmolc dm⁻³; Mg (KCl 1M)= 0,1 cmolc dm⁻³; S-SO₄= 10,8 mg dm⁻³; Al= 0,0 cmolc dm⁻³; H+Al= 2,3 cmolc dm⁻³; SB= 0,6 cmolc dm⁻³; T= 2,9 cmolc dm⁻³; V= 21,8%; m= 0,0%; Zn (Mehlich-1)= 0,6 mg dm⁻³; Fe (Mehlich-1)= 33,6 mg dm⁻³; Mn (Mehlich-1)= 2,0 mg dm⁻³; Cu (Mehlich-1)= 1,1 mg dm⁻³; B (água quente)= 0,6 mg dm⁻³.

As amostras de solo, após secas e peneiradas, foram acondicionadas em vasos plásticos de 7 litros, tendo cada parcela sido constituída de 6 kg de solo. As amostras foram incubadas com carbonato de cálcio (CaCO₃ p.a.) por um período de 30 dias, com a umidade do solo em torno de 60% do volume total de poros (VTP). Adicionaram-se ao solo 0,82 t ha⁻¹ de CaCO₃ p.a. para elevar a saturação por bases em 50%, de acordo com critério recomendado por Alvarez & Ribeiro (1999).

O delineamento experimental foi o de blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial, com 16 tratamentos (quatro doses de Mn, quatro doses de Cu), com três repetições, perfazendo um total de 48 parcelas. As doses de manganês (Mn) foram de 0,0; 1,5; 3,0 e 6,0 mg dm⁻³, adicionadas na forma de

MnSO₄.H₂O p.a. e as doses de cobre (Cu) foram: 0,0; 0,75; 1,5 e 3,0 mg dm⁻³, na forma de CuSO₄.5H₂O p.a..

Após o período de incubação do solo, para elevar a saturação por bases em 50%, foram aplicados os tratamentos contendo Mn e Cu, em forma de solução e misturados ao solo para maior uniformização. A adubação de base também foi realizada no momento da aplicação dos tratamentos, em forma de solução, exceto o fósforo que foi aplicado na forma de pó: N: 400 mg dm⁻³; P: 200 mg dm⁻³; K: 400 mg dm⁻³; Mg: 60 mg dm⁻³; S: 50 mg dm⁻³; B: 0,5 mg dm⁻³; Zn: 5,0 mg dm⁻³; Mo: 0,1 mg dm⁻³, na forma de reagentes p.a., tendo como referência Malavolta (1980).

Após a aplicação dos tratamentos, realizou-se a semeadura do trigo, cultivar IAC-350-Goiapá, de sequeiro. A cultivar é recomendada para o estado de Minas Gerais, apresentando ciclo médio, sendo da classe de pão. A mesma foi escolhida em função de perfilhar e estiolar menos em casa de vegetação. As sementes de trigo receberam tratamento fitossanitário com solução de hipoclorito de sódio a 1% e semeadas na quantidade de 10 sementes por vaso. Após a emergência das plantas, foi realizado o desbaste, ficando seis plantas uniformes e vigorosas por vaso.

A umidade do solo foi mantida entre 60% e 80% do volume total de poros (VTP) do solo, usando-se água destilada, controlada por meio de pesagens dos vasos. Aos 46 DAE, no estágio 49 (final do emborrachamento), fez-se o corte de 3 plantas por vaso, rente ao solo, para posterior análise de tecidos e órgãos foliares. A parte aérea foi lavada em água destilada e deionizada, levada à estufa de circulação forçada de ar a 60°C para secar, até atingir peso constante, pesada e moída. Posteriormente, determinou-se o teor de todos os macronutrientes e micronutrientes Mn, Cu, Zn, Fe e B, conforme procedimentos descritos por Malavolta et al. (1997). As três plantas remanescentes foram mantidas nos vasos até o final do ciclo da cultura para as avaliações do efeito

das doses de Mn e Cu sobre a produção de grãos. As mesmas foram separadas em parte aérea (colmo + folhas), casca e grãos. Todas as partes das plantas de trigo foram pesadas e moídas para, então, realizar o mesmo procedimento realizado no estádio 49.

Ao término do cultivo, foram coletadas amostras de solo, as quais foram posteriormente secas em estufa sob temperatura entre 60° e 65°C, até peso constante. A concentração de manganês e cobre extraível das amostras de solo foi efetuada por uma solução de Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$). No método que utiliza o Mehlich-1, utilizou-se a relação solo/solução de 1:5 e cinco minutos de agitação, de acordo com Mehlich (1984). A determinação do Mn e do Cu nos extratos da solução foi realizada por meio de espectrofotometria de absorção atômica.

Os dados foram submetidos a análises de variância. Quanto às doses de Mn e de Cu, foram feitas análises de regressão polinomial, com relação à produção de matéria seca total, produção de grãos e quanto aos teores e ao acúmulo de Mn e de Cu nas diferentes partes das plantas de trigo. Foram estabelecidas correlações entre os teores de Mn e Cu com o teor de outros elementos no estádio 49 e produção de grãos para o trigo. Todos os testes e procedimentos estatísticos seguiram os procedimentos descritos por Pimentel-Gomes (1984) e o software utilizado nas análises foi o Statistical Analysis System (SAS).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resposta da cultura do trigo à aplicação de manganês e de cobre

5.1.1 Produção de matéria seca em função das doses de Mn e Cu

Pelo teste F da análise de variância, verificou-se efeito significativo ($P < 0,0001$) e diferenciado das doses de Mn e de Cu na produção de matéria seca da parte aérea no estádio 49 (PA-49), da parte aérea no final do ciclo (PA-final) e na produção de grãos de trigo, bem como a interação entre esses dois fatores ($P < 0,0001$).

As doses de Mn proporcionaram um aumento linear na produção de matéria seca na PA-49 (Figura 1a). Os maiores aumentos na produção foram obtidos com a dose de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn, chegando $5,22 \text{ g vaso}^{-1}$. No entanto, o aumento nas doses de Cu ocasionou um decréscimo na produção de matéria seca na PA-49 (Figura 1b). A produção de $4,91 \text{ g vaso}^{-1}$ sem a adição de Cu caiu para $4,40 \text{ g vaso}^{-1}$, na dose de $3,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu.

O efeito positivo na adição de Mn continuou até a produção de matéria seca no final do ciclo. Na matéria seca da PA-final ocorreu produção de $5,95 \text{ g vaso}^{-1}$ com a adição da maior dose de Mn (Figura 1c). Com relação às doses de Cu, a dose $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu proporcionou a maior produção de MS-final: $6,50 \text{ g vaso}^{-1}$ (Figura 1d).

O efeito positivo do Mn durante o ciclo da cultura não foi evidenciado para a produção de grãos. A produção de grãos saiu de $6,38 \text{ g vaso}^{-1}$ sem a adição de Mn, caindo para $5,05 \text{ g vaso}^{-1}$ na maior dose desse elemento (Figura 1a). Contudo, a tendência negativa da adição de Cu para o trigo continuou para a produção de grãos. À medida que aumentavam as doses de Cu a produção de grãos diminuía, chegando a $4,74 \text{ g vaso}^{-1}$ (Figura 1b).

Por meio dos resultados de matéria seca, tem-se uma indicação do fornecimento de nutrientes pelo solo, quais os elementos deficientes e qual a importância dessa deficiência. Desse modo, o aumento da matéria seca com a adição de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn e de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu e o aumento na produção de grãos com a adição de $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn e sem a adição de Cu indica que este solo apresenta teores adequados de Cu, pois ocorreu uma maior resposta à adição de Mn. Entretanto, a produção de matéria seca não pode ser considerada como quesito único para se inferir sobre o fornecimento de Mn e Cu pelas doses utilizadas para a cultura em questão.

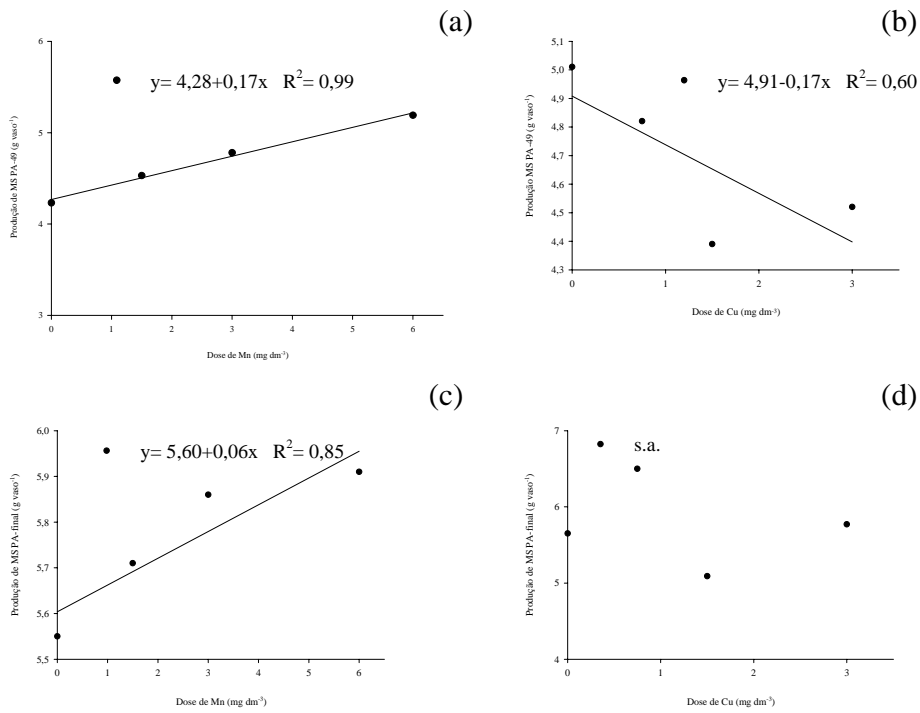


FIGURA 1 Produção de MS na PA-49, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b); produção de MS na PA-final, em função das doses de Mn (c) e das doses de Cu (d) (R^2 = significativo a 5%; s.a.= sem ajuste matemático até 2^o grau).

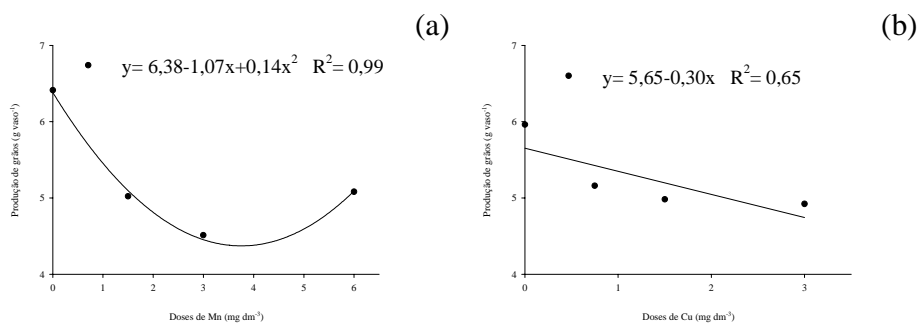


FIGURA 2 Produção de grãos de trigo, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b) (R^2 = significativo a 5%).

5.1.2 Teores de Mn na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu

As doses de Mn e de Cu, assim como a interação entre esses dois fatores, exerceram efeitos significativos sobre os teores de manganês na matéria seca da parte aérea no estágio 49 (PA-49), na parte aérea final (PA-final), na casca e no grão do trigo ($P < 0,0001$).

A adição da maior dose de Mn ao solo proporcionou o maior teor de Mn encontrado na PA-49, chegando a 217 mg kg^{-1} de Mn (Figura 3a). A adição de $2,10 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu resultou em um teor de 193 mg kg^{-1} de Mn na PA-49 (Figura 3b). Quando se avaliou o efeito das doses de Mn, no final do ciclo, também se verificou efeito positivo das doses de Mn sobre o teor de Mn na PA-final. No entanto, o que chamou a atenção foi a drástica redução nesses teores: $3,79 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn na presença da maior dose de Mn (Figura 3c). A adição de $1,02 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu resultou em um teor máximo de $3,51 \text{ mg kg}^{-1}$, também indicando a redução dos teores de Mn na PA-final (Figura 3d).

Quando o Mn não foi adicionado ao solo, as plantas de trigo no estágio 49 continham um teor de 178 mg kg^{-1} de Mn e de 168 mg kg^{-1} quando o Cu não foi adicionado ao solo, indicando que os teores de Mn estão bem acima do considerado como suficiente ($16\text{-}28 \text{ mg dm}^{-3}$) por Malavolta et al. (1997). No entanto, deve-se ressaltar que, neste trabalho, foi avaliada a parte aérea e não a folha isolada.

Durante a condução do experimento, nenhum sintoma de deficiência foi observado para o Mn, no estágio 49. Entretanto, sintomas de toxidez foram visualizados (Figura 1A do Anexo), ocorrendo clorose marginal e franzimento das folhas, clorose nas folhas mais novas semelhante à deficiência de ferro e manchas necróticas, principalmente nas folhas mais velhas (Kohno & Foy, 1983).

O Mn é um dos nutrientes que apresentam as maiores variações em termos de teor nas plantas (Mukhopadhyay & Sharma, 1991). As exigências quantitativas desse nutriente são pequenas e é bem provável que exista, nas células, mais manganês do que aquele utilizado pela planta. Por isso, devido à discrepância entre a necessidade e o teor de Mn encontrado nos tecidos vegetais, isso indica que, ao contrário da maioria dos nutrientes, a absorção de Mn é pouco regulada pela planta, o que pode levar ao acúmulo de Mn a níveis tóxicos (Clarkson, 1988).

A adição da maior dose de Mn proporcionou o maior teor desse elemento encontrado na casca do trigo, chegando a 173 mg kg^{-1} (Figura 4a). A adição de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu resultou no maior teor de Mn na casca, sendo de 161 mg kg^{-1} (Figura 4b). A adição de Mn causou um efeito negativo no teor de Mn nos grãos, tendo o maior teor sido encontrado sem a adição do elemento (121 mg kg^{-1} de Mn) (Figura 4c). A dose $1,80 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu resultou num teor de 116 mg kg^{-1} de Mn no grão (Figura 4d).

Conforme os dados apresentados, o Mn apresenta remobilização dos tecidos mais velhos para os mais novos. A PA-49 apresentou os maiores teores de Mn, seguidos da casca e dos grãos de trigo. Já a PA-final apresentou os menores teores de Mn. O transporte do Mn das raízes para a parte aérea é feito como íon divalente, via xilema, seguindo a corrente transpiratória, sofrendo pouca remobilização. Embora o Mn seja considerado, de modo geral, como de baixa mobilidade no floema da planta (Mengel & Kirkby, 1982), Ohki et al. (1979) também verificaram translocação do Mn de tecidos mais velhos para os mais novos. Portanto, esses resultados corroboram o de tais autores.

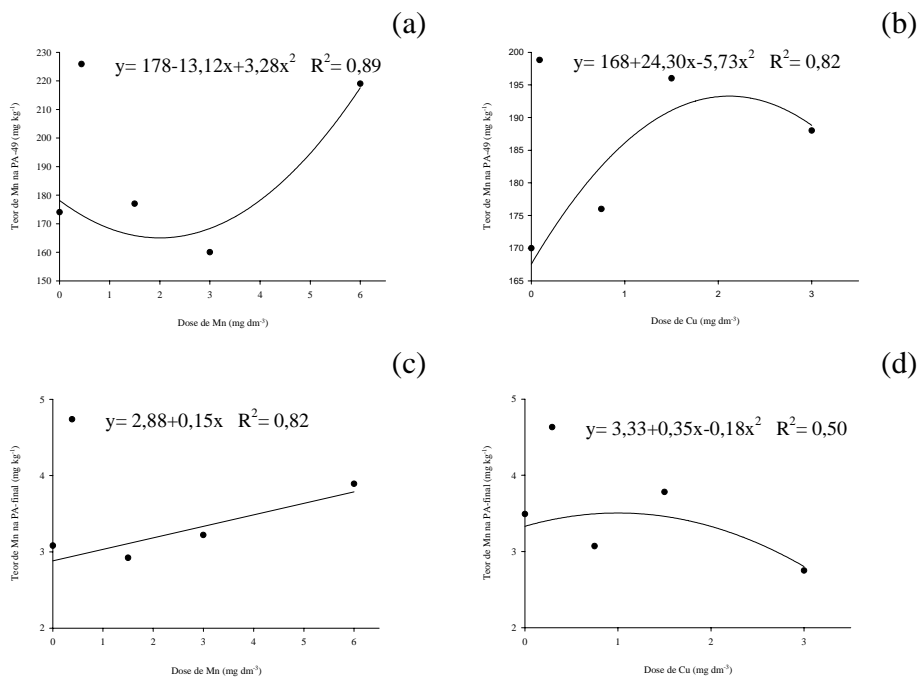


FIGURA 3 Teor de Mn na PA-49, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b); teor de Mn na PA-final, em função das doses de Mn (c) e das doses de Cu (d) (R^2 = significativo a 5%).

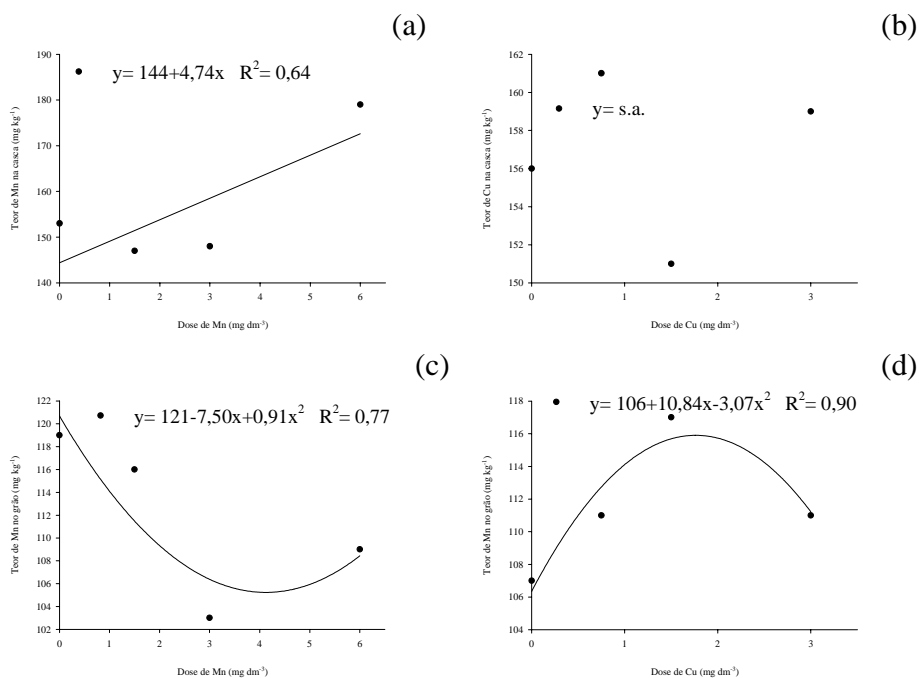


FIGURA 4 Teor de Mn na casca, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b); teor de Mn no grão, em função das doses de Mn (c) e das doses de Cu (d) (R^2 = significativo a 5%; s.a. = sem ajuste matemático até 2^o grau).

5.1.3 Teores de Cu na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu

As doses de Mn e de Cu, assim como a interação entre esses dois fatores, exerceram efeitos significativos sobre os teores de cobre na matéria seca da parte aérea no estádio 49 (PA-49), na parte aérea final (PA-final), na casca e no grão do trigo ($P < 0,0001$).

As doses de Cu apresentaram efeito positivo nos teores de Cu na PA-final, tendo o maior teor sido obtido com a maior dose de Cu, chegando a um teor de 8,09 mg kg⁻¹ (Figura 5a). As doses de Mn também apresentaram efeito

positivo nos teores de Cu na PA-final. A adição da maior dose de Mn foi responsável pelo maior teor de Cu encontrado: 8,75 mg kg⁻¹ (Figura 5b). Isso mostra que os teores de Cu na PA-49 ficaram dentro da faixa de suficiência proposta por Jones Júnior (1973) (5-20 mg dm⁻³) e por Malavolta et al. (1997) (9-18 mg dm⁻³). Na PA-final foram obtidos os maiores teores de Cu: a dose 0,75 mg dm⁻³ de Cu proporcionou um teor de 223 mg kg⁻¹ (Figura 5c), enquanto a maior dose de Mn proporcionou um teor de 226 mg kg⁻¹ (Figura 5d).

As doses de Cu também apresentaram efeito positivo nos teores de Cu na casca, chegando a um teor de 4,20 mg kg⁻¹ na maior dose (Figura 6a). A adição de 3,0 mg dm⁻³ de Mn resultou nos maiores de Cu na casca: 4,21 mg kg⁻¹ (Figura 6b). A adição de 1,5 mg dm⁻³ de Cu resultou em um teor de 4,76 mg kg⁻¹ de Cu no grão (Figura 6c). A dose de 3,84 mg dm⁻³ de Mn proporcionou um teor de Cu no grão de 5,15 mg kg⁻¹ (Figura 6d). Os teores de Cu no grão de trigo sempre estiveram acima dos teores considerados como suficientes (2,5 mg dm⁻³) por Graham & Nambiar (1981).

De acordo com os resultados apresentados, o Cu foi pouco redistribuído para a casca e o grão do trigo, ficando em maior quantidade na parte aérea no final do ciclo da cultura. O transporte no floema parece ocorrer com facilidade, visto que a deficiência pode ser corrigida mediante aplicações foliares de produtos contendo o elemento (Malavolta et al., 1997). Gimenez et al. (1992) encontraram maior acúmulo de cobre nas raízes, comparativamente às concentrações nas folhas e ramos de cafeeiro. Os aumentos de cobre nas folhas e ramos com o aumento da dose de cobre aplicado no solo evidenciam, segundo os autores, o transporte ascendente do metal.

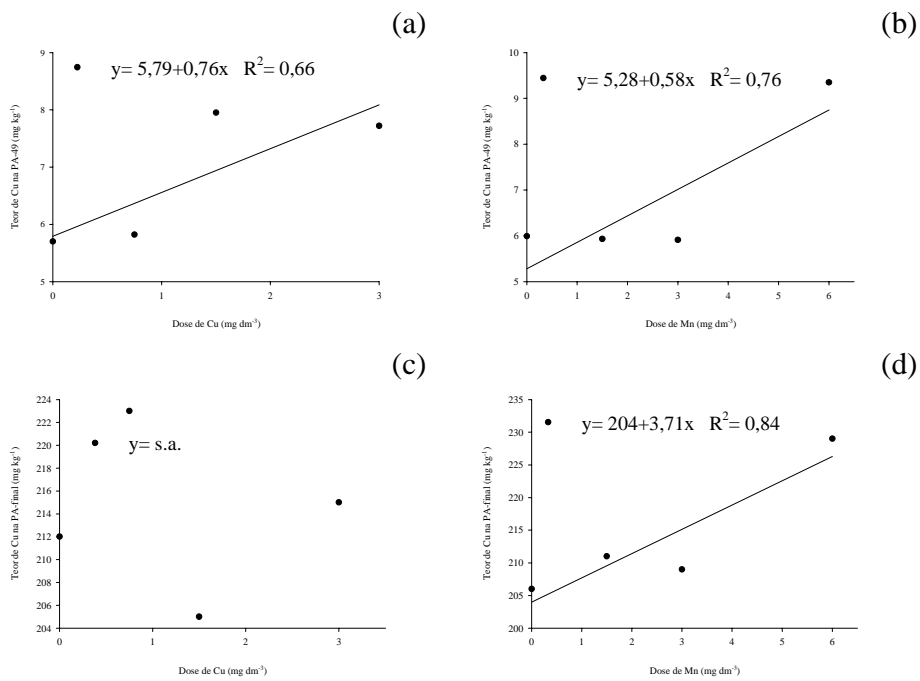


FIGURA 5 Teor de Cu na PA-49, em função das doses de Cu (a) e das doses de Mn (b); teor de Cu na PA-final, em função das doses de Cu (c) e das doses de Mn (d) ($R^2 =$ significativo a 5%).

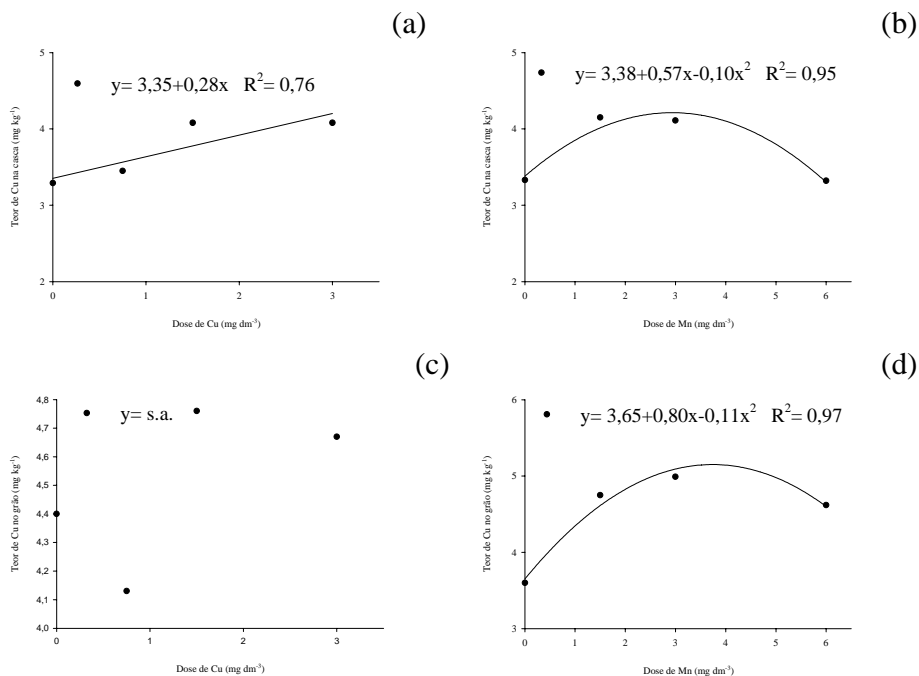


FIGURA 6 Teor de Cu na casca, em função das doses de Cu (a) e das doses de Mn (b); teor de Cu no grão, em função das doses de Cu (c) e das doses de Mn (d) (R^2 = significativo a 5%; s.a.= sem ajuste matemático até 2^0 grau).

5.1.4 Coeficientes de correlação linear entre os teores de Mn e Cu e os teores dos demais nutrientes nas plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu

Os coeficientes de correlação linear de Pearson entre os teores de Mn e de Cu nas plantas de trigo e os teores dos demais nutrientes referentes à PA-49 e aos grãos de trigo são apresentados na Tabela 1.

A seguir apresentam-se as correlações do teor de Mn na PA-49 e no grão de trigo com o teor dos demais nutrientes:

. **mangânês-cálcio:** na PA-49 e no grão, os coeficientes de correlação foram positivos e significativos. De maneira geral, altos níveis de cálcio, bem

como outros cátions, reduzem o teor de Mn no tecido das plantas (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-enxofre:** na PA-49 e no grão, os coeficientes de correlação foram positivos e significativos. De maneira geral, a adição de S no solo aumenta a concentração de Mn em plantas (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-fósforo:** na PA-49, os coeficientes de correlação foram significativos e positivos; no grão, a correlação não foi significativa. Na literatura, não há um consenso sobre o efeito do P sobre o teor de Mn em plantas, estando esse efeito relacionado com o pH do solo. Em algodão, o aumento do P pode ter efeito positivo, neutro ou negativo na concentração de Mn, pois esse efeito depende da relação Ca/P em solução (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-magnésio:** na PA-49, a interação entre o Mn e o Mg não foi significativa. No entanto, no grão, houve efeito significativo e positivo da correlação. A maior quantidade de Mg aplicado via calcário ou fertilizante (Moreira et al., 2003) inibe a absorção de Mn, por se tratar de elementos com valência, raio iônico e grau de hidratação semelhante (Kabata-Pendias & Pendias, 1984). A inibição entre o Mg e o Mn é do tipo não competitiva (Malavolta et al., 1997), na qual a maior absorção de um elemento não pode ser anulada pelo aumento da concentração do outro (Malavolta et al., 1997). No entanto, esse efeito depressivo do Mg sobre o Mn não é universal, pois já foram encontradas correlações positivas entre esses dois elementos para o trigo e a soja (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-nitrogênio:** na PA-49, as correlações foram significativas e positivas entre esses elementos, porém, baixas. Já no grão, a correlação não foi significativa. Maiores quantidades de Mn são encontradas nas folhas das plantas quando uma menor quantidade de N é utilizada na adubação (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-potássio:** para a PA-49, não foi verificado efeito significativo na correlação desses elementos. Já no grão, as correlações foram significativas e positivas. Borkert (1991) relata um aumento na concentração de Mn quando foi realizada a adubação potássica;

. **manganês-boro:** neste trabalho, apesar de ter ocorrido correlação, essa foi negativa e com valores baixos na PA-49, porém, não significativa no grão. O Mn é correlacionado positivamente com o B em folhas de tomate, de trigo e de soja, sendo a correlação mais positiva com o trigo. Entretanto, esse efeito não é encontrado em maçã, em que o aumento de Mn causa efeito negativo no teor de B (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-cobre:** a interação entre esses elementos foi significativa, positiva e alta na PA-49. No entanto, no grão não foi verificado efeito dessa interação. Altas concentrações de Cu na solução diminuem o teor de Mn em folhas de algodão, entretanto, quando se adicionam altos níveis de Mn, isso pode favorecer o aumento de Cu. Tem-se observado correlação negativa entre o Cu e o Mn em folhas de trigo e soja. Plantas deficientes em Cu podem apresentar altas concentrações de Mn quando são cultivadas em casa de vegetação, no entanto, esse efeito não é verificado no campo (Mills & Belton, 1996);

. **manganês-ferro:** tanto na PA-49 quanto no grão ($r = 0,88^{**}$) a correlação não foi significativa, o que Malavolta (1980) atribui a uma interação do tipo inibição competitiva entre o Mn e o Fe. Segundo Zaharieva et al. (1988), as interações entre Fe e Mn ocorrem em dois níveis. No nível de acumulação, o Fe afeta a absorção de Mn e, no nível metabólico, o Mn afeta a atividade do Fe, pela diminuição da concentração desse nutriente, pelo fato de ambos competirem pelo mesmo sítio de absorção. O Mn também é capaz de trocar com o Fe existente nos quelados, fazendo com que diminua sensivelmente a absorção de Fe pelas plantas (Lucena et al., 1988). Nas menores concentrações de Mn, ocorre maior acúmulo de Fe (Malavolta et al., 1997);

. **manganês-zinco:** na PA-49, o coeficiente de correlação foi significativamente positivo e alto ($r = 0,96^{**}$). Já no teor dos grãos ocorreu correlação significativa e positiva, porém, apresentando baixo coeficiente de correlação. O aumento do Mn causa diminuição no teor de Zn em folhas de sorgo e milho, no entanto, tem efeito positivo em plantas de soja e trigo, e nenhum efeito sobre folhas de pêra (Mills & Belton, 1996).

A seguir apresentam-se as correlações do teor de Cu na PA-49 e do grão de trigo com o teor dos demais nutrientes:

. **cobre-cálcio:** tanto na PA-49 quanto no grão não foi verificado efeito significativo da interação Cu/Ca. A adição de Ca via calcário pode reduzir a concentração de Cu nas plantas (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-enxofre:** na PA-49, essa interação foi significativa e positiva, no entanto, no grão essa interação foi significativa e negativa. Na literatura consultada não foi encontrada nenhuma menção a respeito da interação Cu/S;

. **cobre-fósforo:** tanto na PA-49 quanto no grão o efeito da interação entre esses elementos foi significativo e positivo. Altas concentrações de P no substrato resultam em um aumento na deficiência de Cu em plantas, pois a adição de P resulta em uma diminuição no teor de Cu em plantas como feijão, tomate, beterraba e mamão (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-magnésio:** tanto na PA-49 quanto no grão não foi verificado efeito significativo da interação Cu/Mg. Na literatura consultada não foi encontrada nenhuma menção a respeito da interação Cu/MG;

. **cobre-nitrogênio:** o efeito na PA-49 não foi significativo, enquanto no grão esse efeito foi significativo e positivo. A adição de N, especialmente em solos com baixo teor de Cu, causa um aumento na deficiência de Cu em plantas. Aplicações foliares de Cu aumentam o teor de N, bem como de P, K, Ca e Mg em plantas. Esse aumento pode ser devido a um efeito catalisador do Cu no

metabolismo das plantas, havendo aumento na absorção desse elemento (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-potássio:** a interação do Cu/K não foi significativa na PA-49, entretanto, no grão, o efeito dessa interação foi significativo e negativo. A aplicação foliar de KH_2PO_4 reduz a concentração de Cu em folhas de nogueira (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-boro:** a correlação entre esses elementos foi significativa e negativa na PA-49, não tendo havido, no grão, efeito significativo. Na literatura consultada não foi encontrada nenhuma menção a respeito da interação Cu/B;

. **cobre-ferro:** a correlação do Cu com o Fe foi significativa e positiva tanto na PA-49 quanto no grão. Os efeitos nocivos de altas concentrações de Cu na disponibilidade do Fe são bem documentados (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-manganês:** a interação entre esses elementos foi significativa, positiva e alta na PA-49, no entanto, no grão não foi verificado efeito dessa interação. Altas concentrações de Cu na solução diminuem o teor de Mn em folhas de algodão, entretanto, quando se adiciona, altos níveis de Mn, isso pode favorecer o aumento de Cu. Tem-se observado correlação negativa entre o Cu e o Mn em folhas de trigo e soja. Plantas deficientes em Cu podem apresentar altas concentrações de Mn quando são cultivadas em casa de vegetação, no entanto, esse efeito não é verificado no campo (Mills & Belton, 1996);

. **cobre-zinco:** na PA-49, os coeficientes de correlação foram significativos e positivos. Já para o grão, não houve efeito significativo. Aumentos na concentração de Zn em solução diminuem o teor de Cu em folhas de feijão e em folhas e em hastes de algodão. Aumentos na concentração de Cu na solução podem ocasionar aumentos no teor de Zn em folhas, hastes e raízes de algodão, entretanto, esses efeitos dependem da variedade (Mills & Belton, 1996).

TABELA 1 Coeficientes de correlação entre os teores de Mn e de Cu e os teores dos demais nutrientes referentes à PA-49 e grãos das plantas de trigo (1º cultivo) cultivadas em um Latossolo Vermelho-Amarelo.

PA-49		
	Mn	Cu
Teor de macronutrientes (g kg ⁻¹)		
Ca	0,33*	0,23 ^{ns}
S	0,49**	0,55**
P	0,59**	0,61**
Mg	-0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}
N	0,33*	0,25 ^{ns}
K	-0,26 ^{ns}	-0,24 ^{ns}
Teor de micronutrientes (mg kg ⁻¹)		
B	-0,48**	-0,35**
Cu	0,92**	-
Fe	0,26 ^{ns}	0,33*
Mn	-	0,92**
Zn	0,96**	0,92**
Grão		
Teor de macronutrientes (g kg ⁻¹)		
	Mn	Cu
Ca	0,67**	-0,10 ^{ns}
S	0,57**	-0,43**
P	0,20 ^{ns}	0,31*
Mg	0,30*	0,15 ^{ns}
N	-0,07 ^{ns}	0,52**
K	0,57**	-0,33*
Teor de micronutrientes (mg kg ⁻¹)		
B	-0,22 ^{ns}	-0,24 ^{ns}
Cu	0,04 ^{ns**}	-
Fe	0,12 ^{ns}	0,55**
Mn	-	0,04 ^{ns}
Zn	0,28*	-0,01 ^{ns}

** , * , ns: significativo a 1% e 5% e não significativo, respectivamente.

5.1.5 Acúmulo de Mn na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu

Semelhante ao que ocorreu para os teores de Mn, nas diversas partes das plantas, observou-se que as doses de Mn e de Cu influenciaram no acúmulo de Mn na matéria seca das plantas de trigo, bem como a interação dos mesmos ($P < 0,0001$).

As doses de Mn apresentaram efeito positivo no acúmulo de Mn pelas plantas de trigo na PA-49. À medida que aumentaram as doses, também ocorreu aumento no acúmulo de Mn, chegando ao máximo de $1.057 \mu\text{g vaso}^{-1}$, com a maior dose de Mn (Figura 7a). A adição de $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu proporcionou o maior acúmulo de Mn, encontrado na PA-49, chegando ao acúmulo de $877 \mu\text{g vaso}^{-1}$ (Figura 7b). O efeito positivo das doses de Mn sobre o acúmulo de Mn continuou na PA-final, no entanto, os valores caíram drasticamente. Na maior dose de Mn, o acúmulo foi de $22,29 \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Mn (Figura 7c). Já as doses de Cu apresentaram efeito negativo no acúmulo de Mn na PA-final, mas, mesmo assim, o acúmulo de Mn diminuiu drasticamente, independente das doses de Cu (Figura 7d).

À medida que se aumentavam as doses de Mn, ocorreu aumento no acúmulo de Mn na casca, chegando a um acúmulo máximo de $641 \mu\text{g vaso}^{-1}$, na maior dose de Mn (Figura 8a). A dose de $3,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu proporcionou um acúmulo de Mn de $536 \mu\text{g vaso}^{-1}$ na casca (Figura 8b). Com relação ao acúmulo de Mn no grão, ocorreu efeito negativo das doses de Mn e de Cu, mas, mesmo assim, o acúmulo foi alto. Sem a adição de Mn e de Cu, o acúmulo de Mn no grão foi de $620 \mu\text{g vaso}^{-1}$ (Figura 8c,d).

Os maiores acúmulos de Mn verificados na PA-49, na casca e no grão, em relação aos encontrados na PA-final, sugerem que o Mn sofreu translocação para os grãos de trigo, ficando, portanto, mais na parte reprodutiva. Isso não era esperado, uma vez que o Mn apresenta baixa translocação para os grãos, ficando

mais na parte vegetativa (Malavolta, 1980). Segundo o mesmo autor, cerca de 75% do Mn é encontrado na parte aérea e apenas 12% na casca e 13% nos grãos.

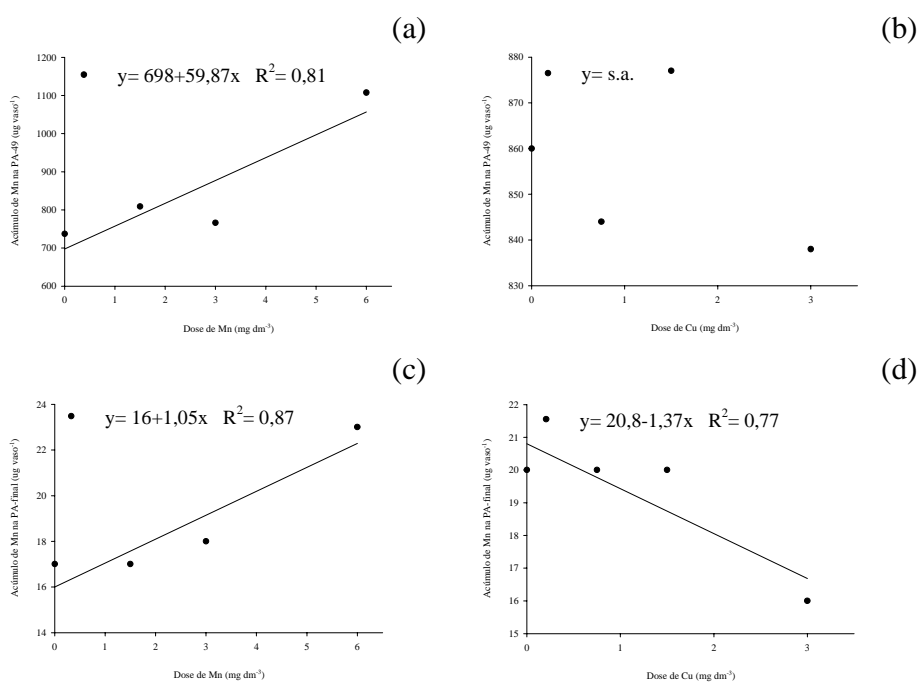


FIGURA 7 Acúmulo de Mn na PA-49, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b); acúmulo de Mn na PA-final, em função das doses de Mn (c) e das doses de Cu (d) ($R^2 =$ significativo a 5%).

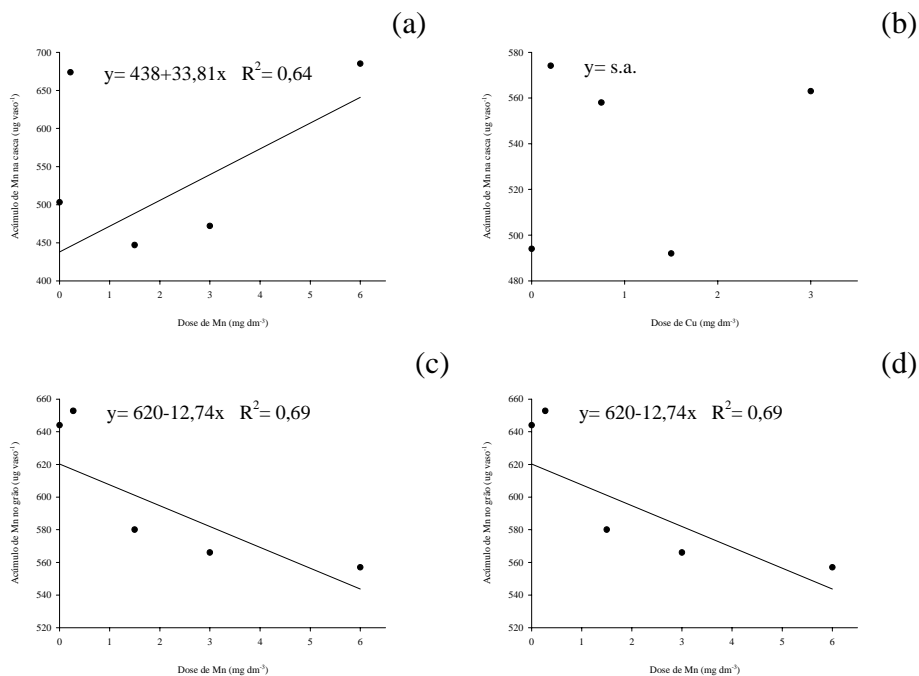


FIGURA 8 Acúmulo de Mn na casca, em função das doses de Mn (a) e das doses de Cu (b); acúmulo de Mn no grão, em função das doses de Mn (c) e das doses de Cu (d) (R^2 = significativo a 5%; s.a.= sem ajuste matemático até 2^o grau).

5.1.6 Acúmulo de Cu na matéria seca das plantas de trigo, em função das doses de Mn e Cu

A análise de variância mostrou interação significativa para o acúmulo de Cu, em função das doses de Cu e de Mn, para todas as variáveis em estudo ($P < 0,0001$).

As doses de Cu apresentaram efeito positivo no acúmulo de Cu pelas plantas de trigo na PA-49. À medida que aumentaram as doses, também ocorreu aumento no acúmulo de Cu, chegando ao máximo de 36,89 µg vaso⁻¹ com a maior dose de Cu (Figura 9a). As doses de Mn também apresentaram efeito

positivo no acúmulo de Cu na PA-49, chegando a $44,60 \mu\text{g vaso}^{-1}$, na maior dose de Mn (Figura 9b). A dose de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu proporcionou um acúmulo de $1.451 \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Cu na PA-final, bem superior ao encontrado na PA-49 (Figura 9c). Já as doses de Mn apresentaram efeito positivo no acúmulo de Cu na PA-final, chegando a $1.349 \mu\text{g vaso}^{-1}$ de Cu na maior dose de Mn, sendo o acúmulo de Cu também superior ao encontrado na PA-49 (Figura 9d).

À medida que aumentavam as doses de Cu, ocorreu um aumento no acúmulo de Cu na casca, chegando ao máximo de $14,37 \mu\text{g vaso}^{-1}$, na maior dose de Cu (Figura 10a). A dose de $4,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn proporcionou um acúmulo de Cu de $13,48 \mu\text{g vaso}^{-1}$ na casca (Figura 10b). Com relação ao acúmulo de Cu no grão, com a adição de $3,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu e de Mn ocorreu um acúmulo de $24,00 \mu\text{g vaso}^{-1}$ (Figura 10c,d).

Os menores acúmulos de Cu foram observados na PA-49, na casca e no grão do trigo, tendo a maior parte ficado acumulada na PA-final, seguindo a mesma tendência que foi observada para os teores de Cu. Segundo Malavolta (1980), mais de 50% do Cu está presente no produto colhido. No entanto, isso não foi verificado neste trabalho.

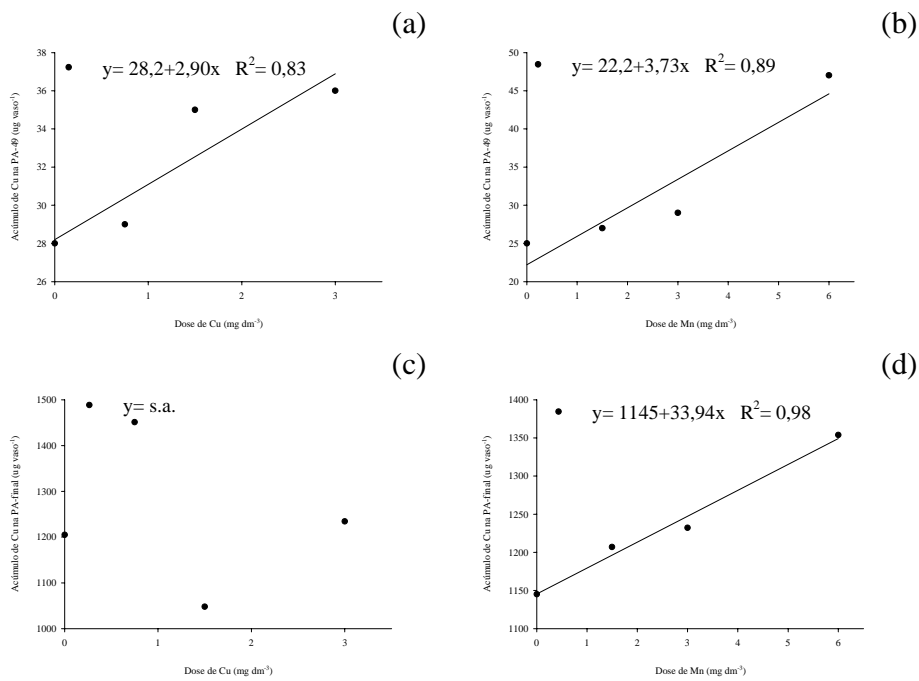


FIGURA 9 Acúmulo de Cu na PA-49, em função das doses de Cu (a) e das doses de Mn (b); acúmulo de Cu na PA-final, em função das doses de Cu (c) e das doses de Mn (d) ($R^2 =$ significativo a 5%).

